

**DESARROLLO DE UN MODELO EN LA  
CUENCA ALTA DEL RÍO NEGRO  
(URUGUAY) UTILIZANDO HYDROBID:  
ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN  
DIFERENTES ESCENARIOS**

**DEVELOPMENT OF A MODEL IN THE  
HIGH BASIN OF THE RÍO NEGRO,  
URUGUAY, USING HYDROBID:  
ANALYSIS OF WATER AVAILABILITY IN  
DIFFERENT SCENARIOS  
MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA  
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**Presentado por:**

**Ing. MARCELO SADRES BLANCO**

**Dirigido por:**

**Dr. JUAN ANTONIO PASCUAL AGUILAR**

**Alcalá de Henares, a 03 de junio de 2019**

## AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a quienes han colaborado para que este trabajo sea una realidad. Particularmente a quienes han colaborado propiciando información: al Instituto Nacional de Meteorología del Uruguay, a Marisol Mallo, Silvana Martinez y Pablo Kok de la Dirección Nacional de Medio Ambiente, al Edil Departamental Mariano Tucci, al Senador de la República Andrés Berterreche, a las ingenieras Victoria Moreira y Leticia Martinez y a la contadora Ana Rey.

A Juan Antonio Pascual quien muy amablemente ha dirigido este Trabajo.

Muy especialmente a Delia Huañambal, quien de forma desinteresada ha colaborado una y mil veces en lo que refiere a la utilización del HydroBID.

A mis amigos y afectos de aquí y allá.

A Titina por enseñarme el valor de la generosidad.

A Tete por enseñarme el valor de la lealtad.

A Felicia por enseñarme el sentido de la resiliencia, como manera de afrontar la vida.

A mi padre por el apoyo en cada momento, porque en él se representa el valor de la familia.

A mi madre, mi primer refugio gracias por tu amor incondicional.

A mi hermana, mi compañera de equipo desde siempre, quien cuida de mis espaldas en cada momento.

### *Esto es agua*

*Están dos peces nadando uno junto al otro cuando se topan con un pez más viejo nadando en sentido contrario quien los saluda y les dice, "Buen día muchachos ¿Cómo está el agua hoy?" Los dos peces siguen nadando hasta que después de un tiempo uno voltea hacia el otro y pregunta "¿Qué es el agua?"*

**David Foster Wallace**

## Contenido

1. Resumen Ejecutivo .....	9
2. Introducción.....	10
2.1. El agua como recurso escaso .....	10
2.2. Introducción a los modelos hidrológicos .....	10
2.3. Modelos de flujo: Relación precipitación-escorrentía .....	12
2.4. Introducción al Sistema Hydro-BID .....	14
2.5. El caso de estudio .....	15
2.5.1. Objetivo General .....	16
2.5.2. Objetivos específicos.....	16
2.6. Descripción general de la cuenca.....	16
2.6.1. Características topográficas y geológicas.....	17
2.6.2. Usos del suelo .....	19
2.6.3. Climatología.....	20
2.6.4. Generación Hidroeléctrica.....	20
2.6.5. Toma de aguas superficiales .....	21
2.6.6. Efectos en el ciclo del agua por la implantación de la planta de celulosa .....	22
2.7. Marco Reglamentario sobre caudales ambientales .....	22
3. Materiales y Métodos .....	24
3.1. Funcionamiento del Sistema HydroBID.....	24
3.2. Cálculos del Modelo del GWLF.....	25
3.2.1. Evapotranspiración potencial .....	25
3.2.2. Escorrentía.....	26
3.2.3. Percolación.....	27
3.2.4. Flujo .....	27
3.3. Recopilación de los datos .....	28
3.3.1. Número de Curva .....	28
3.3.2. Datos de cobertura del suelo .....	28
3.3.3. Datos de tipo de suelo .....	28

3.3.4. Datos de Precipitaciones y Temperaturas .....	28
3.3.5. Datos de caudales .....	29
3.4. Calibración del modelo.....	30
3.4.1. Parámetros del modelo .....	30
3.4.2. Medidas de bondad del ajuste .....	31
3.5. Validación del modelo .....	32
3.6. Escenarios climáticos.....	33
4. Resultados.....	35
4.1. Subcuenca Estación Aguiar .....	35
4.1.1. Calibración .....	35
4.1.2. Validación .....	36
4.2. Subcuenca Estación Pereira .....	37
4.2.1. Calibración .....	38
4.2.2 Validación .....	39
4.3. Subcuenca Estación Manuel Díaz.....	40
4.3.1. Calibración .....	41
4.3.2. Validación .....	42
4.4. Subcuenca Estación Laguna I .....	43
4.4.1. Calibración .....	43
4.4.2. Validación .....	44
4.5. Cálculo de agua no disponible por conservación de caudales ecológicos .....	46
4.6. Simulación de aportes utilizando los escenarios climáticos .....	46
4.7. Requerimientos de agua para nuevas plantaciones .....	48
5. Discusión de los resultados.....	49
5.1. Sobre la calibración del modelo y los parámetros obtenidos.....	49
5.2. Sobre la validación del modelo.....	52
5.3. Sobre los efectos del cambio climático.....	53
5.4. Sobre la disponibilidad de agua en la cuenca .....	54
5.4.1. Incremento en el consumo de agua por las nuevas plantaciones de eucalyptus .....	54

5.4.2. Disponibilidad de agua en la cuenca .....	55
6. Conclusiones.....	58
7. Bibliografía.....	59
8. Anexo I- Clasificación de los modelos hidrográficos.....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Determinación de la Cuenca en estudio.....	17
Figura 2. Alturas topográficas en la región de la Cuenca.....	18
Figura 3. Mapa esquemático de Regiones Geológicas del Uruguay.....	18
Figura 4. Cobertura del suelo en Uruguay.....	19
Figura 5. Área que sirve a cada una de las presas del Río Negro.....	20
Figura 6. Toma de aguas superficiales para el abastecimiento de agua potable.....	21
Figura 7. Toma de aguas superficiales para usos distintos al suministro de agua potable.....	21
Figura 8. Representación esquemática del funcionamiento de HidroBID.....	24
Figura 9. Representación conceptual del modelo que utiliza el GWLF.....	25
Figura 10. Área de captación Estación Aguiar.....	35
Figura 11. Gráfico de series temporales de caudales para la calibración de Estación Aguiar.....	36
Figura 12. Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal para la calibración de Estación Aguiar.....	36
Figura 13. Gráfico de series temporales de caudales para la validación de Estación Aguiar.....	37
Figura 14. Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal validación de Estación Aguiar.....	37
Figura 15. Área de captación subcuenca Estación Pereira.....	38
Figura 16. Gráfico de series temporales de caudales para la calibración Estación Pereira.....	39
Figura 17. Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal para la calibración de Estación Pereira.....	39
Figura 18. Gráfico de series temporales de caudales y de mejor ajuste de regresión lineal para la validación de Estación Pereira.....	40
Figura 19. Área de captación subcuenca Estación Manuel Díaz.....	40
Figura 20. Gráfico de series temporales de caudales para la calibración de Estación Manuel Díaz.....	41
Figura 21. Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal para la calibración de Estación Manuel Díaz.....	42
Figura 22. Gráfico de series temporales de caudales y de mejor ajuste de regresión lineal para la validación de Estación Manuel Díaz.....	42
Figura 23. Área de captación subcuenca Estación Laguna I.....	43
Figura 24. Gráfico de series temporales de caudales para la calibración de Laguna I.....	44
Figura 25. Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal para la calibración de Estación Laguna I.....	44
Figura 26. Gráfico de series temporales de caudales para la validación de Estación Laguna I.....	45

Figura 27. Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal para la validación de Estación Laguna I.....	45
Figura 28. Aportaciones anuales en Estaciones Pereira y Aguiar para los escenarios climáticos....	47
Figura 29. Aportaciones anuales en Estaciones M. Díaz y Laguna I para los escenarios climáticos.....	47
Figura 30. Disponibilidad de agua en la cuenca alta del Río Negro.....	56
Figura 31. Disponibilidad de agua en la cuenca del Río Tacuarembó.....	56

## **TABLA DE ABREVIATURAS**

AHD: Base de Datos de Hidrología Analítica por sus siglas en inglés
ONU: Organización de Naciones Unidas
WHO: Organización Mundial de la Salud por sus siglas en inglés
UNICEF: Fondo de la Naciones Unidas para la Infancia por sus siglas en inglés
RAPAL: Red de Acción de Plaguicidas y sus Alternativas para América Latina
BID: Banco Interamericano de Desarrollo
GWLF: Factor de Carga de Cauces Generalizados por sus siglas en inglés
MVOTMA: Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente
UTE: Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas
DINAMA: Dirección Nacional de Medio Ambiente
DBO: Demanda Biológica de Oxígeno
PET: Evapotranspiración Potencial por sus siglas en inglés
U.S.: United States
CN: Número de Curva
USGS: United States Geological Survey
HWSD: Base de Datos Mundial de Suelos Armonizada, por sus siglas en inglés
FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación
UNESCO: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
INIA: Instituto de Investigaciones Agropecuarias
INMET: Instituto de Meteorología Brasil
INUMET: Instituto Uruguayo de Meteorología
AWC: Contenido de Agua Disponible en el Suelo

## 1. Resumen Ejecutivo

El agua constituye un recurso escaso, y existe a nivel global una competencia por su uso, como consecuencia del aumento poblacional, el desarrollo socioeconómico, los modelos de consumo y los efectos del cambio climático. Los modelos hidrológicos han de significar una herramienta valiosa en la gestión de los recursos, y se utilizan para elaborar estrategias adecuadas en la asignación del agua, analizar la viabilidad de proyectos y evaluar situaciones medioambientales. HydroBID ha desarrollado un modelo de simulación continua para la región de América Latina y el Caribe, a partir del desarrollo de una Base de Datos de Hidrología Analítica (AHD), y un software que incorpora un modelo de precipitación escorrentía basado en el Factor de Carga de Cauces Generalizados.

El objetivo específico de este trabajo es a través de esta herramienta, desarrollar un modelo que permita determinar las aportaciones de agua en la Cuenca Alta del Río Negro (Uruguay), considerando distintos escenarios futuros, y teniendo en cuenta además las novedades que introduce la legislación uruguaya en lo que refiere a la necesidad de determinar caudales ambientales en los ríos.

El proceso de calibración- validación se ha realizado utilizando series temporales de caudal en cuatro estaciones de aforo en el periodo temporal 1995-2018. De manera general ha de indicarse que el parámetro obtenido para el Número de Curva, que determina la escorrentía directa luego de un suceso de precipitación, es más bajo de lo esperado, lo que puede explicarse por el tamaño de las cuencas en estudio, y la cantidad de pequeños embalses en la región para abastecer cultivos de arroz. Así mismo los valores observados para la infiltración, escorrentía superficial y percolación profunda se explican a partir de las características hidrogeológicas de cada una de las cuencas de captación.

Los efectos en el cambio climático en la aportación de agua superficial se estiman en el intervalo -4.2 a -7.1% (dependiendo de la subcuenca) para un escenario en que la temperatura media aumenta 1.3 °C.

La incorporación de nuevas hectáreas de eucalyptus, como consecuencia de nuevas actividades industriales en la región, determinarán cambios en el ciclo hidrológico, como cambio en la evapotranspiración total, así como agua interceptada, que no alcanza el suelo.

De manera inicial y a partir del análisis realizado ha de indicarse que no se pondrá en riesgo el cumplimiento de los caudales ambientales en los escenarios futuros, aunque es de esperarse una presión incremental sobre el recurso, que puede significar condicionamiento para otros usos.

## 2. Introducción

### 2.1. El agua como recurso escaso

El uso de agua ha venido aumentando un 1% anual en todo el mundo desde los años 80 del siglo pasado, impulsado por una combinación del aumento poblacional, desarrollo socioeconómico y cambio en los modelos de consumo. La demanda de agua se espera siga creciendo a un ritmo parecido hasta el año 2050, lo que ha de significar un incremento del 20 al 30% por encima del nivel actual de uso (ONU, 2019). Actualmente más de 2.000 millones de personas viven en países que sufren fuerte escasez de agua, y se espera que la presión sobre el recurso se intensifique, como consecuencia además de los efectos del cambio climático.

Uruguay tiene uno de los índices de acceso de agua potable más altos de América Latina, alcanzando el 97% (WHO/UNICEF, 2006). Los principales desafíos en la materia significan asegurar las adecuadas condiciones de saneamiento para el entorno semi-urbano, y los asentamientos urbanos en situación de vulnerabilidad, así como el adecuado tratamiento de los efluentes domiciliarios.

Considerando la disponibilidad de recursos no es de esperar que Uruguay sufra de estrés hídrico en los próximos decenios. Sin embargo, la incorporación de nuevas tecnologías agrícolas, y en particular el regadío, así como nuevas cadenas agroindustriales en los últimos 15 años, con alto consumo, han puesto el tema del agua sobre la mesa en la opinión pública. Al mismo tiempo se ha constatado en los últimos 20 años un deterioro permanente en la calidad de los cursos de agua, con situaciones de eutrofización y necesidad de mayores inversiones en los procesos de potabilización (RAPAL Uruguay, 2010).

### 2.2. Introducción a los modelos hidrológicos

Un modelo se desarrolla a efectos de representar de manera simplificada la realidad que se quiere estudiar, y así facilitar su comprensión. Realizar un modelo implica establecer las relaciones entre las distintas variables que interfieren o explican determinado fenómeno, a través de la aplicación de expresiones matemáticas y lógicas. Así mismo, un modelo hidrológico constituye la representación simplificada de determinados procesos del ciclo hidrológico, por medio de un conjunto de conceptos hidrológicos expresados en forma matemática y ligados por una secuencia espaciotemporal (Arias Lastre, 2015).

Los modelos hidrológicos se utilizan para variados propósitos en proyectos de planificación, diseño y operación de las infraestructuras del agua. A gran escala, los modelos



se utilizan para proyectos de protección contra inundaciones, mantenimiento y rehabilitación de presas, manejo de planicies aluviales, evaluación de la calidad del agua y previsión de abastecimiento de agua. Los modelos de cuencas son fundamentales para la evaluación de los recursos hídricos disponibles permitiendo analizar la cantidad y calidad del flujo de agua, gestionar las reservas del recurso, proteger las aguas subterráneas, diseñar sistemas de distribución y elaborar estrategias adecuadas de manejo conjunto de los recursos de agua superficiales y subterráneas (Singh y Woolhiser, 2002).

El realizar un modelo, consiste bien en poder predecir la escurrimiento que producirá una precipitación determinada sobre una cuenca (modelos de flujo), o bien en poder determinar de qué manera se ha de alterar las características de un curso de agua y su cuenca por un suceso determinado (modelos de transporte). Los modelos de transporte podrán ser utilizados entonces para analizar procesos de erosión y contaminación.

De igual manera los modelos hidrogeológicos han de poder clasificarse de acuerdo a la extensión temporal que analiza. Así podremos distinguir entre modelos que simulan un suceso puntual, y modelos de simulación continua.

Una clasificación más completa de los modelos hidrológicos se incorpora en la tabla del anexo I de acuerdo a lo propuesto por Rodríguez López, 2011. En este apartado además se caracterizan cada uno de estos modelos, según los criterios adoptados por el autor.

Cuando nos enfrentamos a un ejercicio de aplicación concreto, la primera fase será la selección del modelo más adecuado para cada situación, lo que resulta del análisis de las necesidades planteadas. Luego de esto ha de realizarse la parametrización, calibración y validación del modelo.

En la actualidad existen múltiples modelos hidrológicos que han de utilizarse en el mundo. Según Singh y Woolhiser (2002), *“el modelo HEC-HMS es considerado el estándar para el diseño de sistemas de drenaje en el sector privado de los Estados Unidos, para cuantificar los efectos por el uso de la tierra en las inundaciones, etc.”* Este mismo trabajo menciona el modelo NWS como el estándar para el pronóstico de inundaciones en este país, el modelo UBC y los modelos WATFLOOD para simulación hidrológica en Canadá, y los modelos RORB y WBN para pronóstico de inundaciones, diseño de drenajes y evaluación del efecto del cambio en el uso del suelo en Australia. Por último, el modelo TOPMODEL y SHE son los utilizados en muchos países europeos, mientras que el ARNO, LCS y TOPIKAPI son populares en Italia.

### 2.3. Modelos de flujo: Relación precipitación-escorrentía

El proceso de calcular la escorrentía que producirá una precipitación determinada es complejo, pero de manera inicial podrá indicarse que el objetivo es para un proceso de precipitación, separar la parte que ha de generar escorrentía directa, y que también se denomina como precipitación neta o efectiva, de la que no genera escorrentía, que quedará como retención superficial o infiltración profunda. Posteriormente esta agua terminará evapotranspirándose o llegando a los acuíferos regionales, pero en todo caso será agua perdida para la escorrentía directa y se la denomina abstracciones (Sánchez San Román, 2017).

En la actualidad los modelos distribuidos o semi-distribuidos abordan el proceso de modelado a través de una arquitectura modular, dividiendo el modelo, en distintos submodelos interconectados entre sí, como ha de ser la entrada de precipitación, el almacenamiento y pérdidas en la fase área del ciclo hidrológico, los procesos de generación de escorrentía y transmisión de flujos en la zona del suelo (considerando planos horizontales y verticales), y la dinámica de la circulación del agua en las capas profundas. Sin embargo, aun concibiendo el modelado de manera que separa los principales componentes, en ocasiones cuando se dispone de escasas mediciones reales, puede ser más conveniente y realista recurrir a modelos que los integra, como ha de ser el caso por ejemplo del HEC-HMS, a través del parámetro denominado Número de Curva (CN) y la posterior obtención del almacenamiento máximo de la cuenca ante circunstancias de humedad antecedente dadas y la precipitación neta (Pascual Aguilar y Díaz, 2016).

El CN, que también es utilizado como parámetro por HydroBID es una función de la abstracción inicial, y para su evaluación se utilizan tablas en función del tipo del suelo, uso del suelo, y pendiente, y ha de corregirse en función del grado de humedad previo en el suelo. Por ejemplo, ha de indicarse que, si los días anteriores a la precipitación estudiada se produjeron precipitaciones abundantes, las abstracciones serán menores, y en sentido contrario, si los días anteriores no ha llovido, el suelo estará seco y las abstracciones serán mayores. Esta corrección ha de realizarse a través de relaciones matemáticas empíricas (BID, 2014; Sánchez San Román, 2017).

HMS o HydroBID, como modelos continuos, intentan simular todo el proceso hidrológico, consideran la humedad del suelo, y tienen en cuenta los distintos mecanismos por lo que la precipitación puede ser retenida, vegetación, retenciones superficiales, suelo y acuífero.

Un concepto que se introduce es el de intercepción, que representa la parte de la precipitación que no alcanza la superficie y es retenida por las plantas, y que por tanto afecta la dinámica hidrológica. La sustitución de pasturas naturales por plantaciones forestales interfiere de manera significativa en la intercepción (Belmonte y Romero, 1999; Díaz y Rébora, 2003; Martínez Fernández, 2014). Díaz y Rébora (2003) en su trabajo indican que: *“los resultados de 94 estudios de cuencas comparativas demostraron que los bosques de eucalipto ocasionan en promedio una reducción de 40 mm en el escurrimiento anual por cada 10% de cambio en cobertura respecto de los pastos naturales (de acuerdo a Bosch y Hewlett, 1982). Además, un monte adulto de Eucaliptus intercepta del 11-20% de la lluvia total (según Leite et al. 1997)”*.

En un estudio realizado por estos autores entre 1999 y 2001 habiéndose registrado 1.543 mm de lluvia, la precipitación interna en el monte adulto alcanzó a 1.364 mm. Esto significa que el 88,4% de la precipitación total llegó al suelo del monte forestal, mientras el 11,6% restante fue interceptado por ramas, hojas y troncos, de donde se evapora a la atmósfera.

Para evaluar el consumo de agua por plantaciones de eucaliptus en cuencas del Uruguay ha de mencionarse el trabajo de maestría realizado por Martínez L., 2013. A partir del mismo en el periodo comprendido entre octubre de 2006 y setiembre de 2009 se obtuvieron registros de precipitación total, precipitación directa, escurrimiento superficial y contenido del agua en el suelo. Los resultados obtenidos muestran que el consumo de agua, o evapotranspiración total, de la cobertura forestal varió entre 829 y 1318 mm/año. Los valores promedios diarios de evapotranspiración se han calculado en 3,9 y 3,6 mm, para el periodo estival (octubre-marzo), para la cobertura forestal y de pastura respectivamente; en los meses de invierno (abril-setiembre) los mismos alcanzaron 1,7 y 1,5 mm. La diferencia en el consumo de agua entre coberturas se debió a la intercepción del dosel, que varió entre 19 y 24 % de la precipitación anual, mientras que ésta se asumió despreciable en la pastura.

La sustitución progresiva de pasturas naturales por montes de eucaliptus ha de significar, por tanto, un cambio en el ciclo hidrológico de la cuenca por considerar un porcentaje del agua que nunca alcanzará la superficie del suelo representando así cambios en las dinámicas de almacenamiento y flujo que se establecen en el suelo e infiltración profunda.

## 2.4. Introducción al Sistema Hydro-BID

Hydro-BID se ha desarrollado como un sistema integrado y cuantitativo para simular hidrología y gestión de recursos hídricos en la región de América Latina y el Caribe, bajo escenarios de cambio (por ejemplo, clima, uso de suelo, población), que permite evaluar la cantidad, las necesidades de infraestructura, y el diseño de estrategias y proyectos de adaptación a estos cambios. El objetivo que se propuso el Banco Interamericano de Desarrollo fue ofrecer una plataforma que permita interactuar con otras herramientas (por ejemplo, los sistemas de información geográfica), accesible en la región, propiciando un marco para la parametrización de modelos, utilizando una Base de Datos de Hidrología Analítica (AHD), cuyas características se definen a continuación:

- Una estructura de cuencas de polígono con un esquema único de identificación de cuencas, en adelante COMID.
- Una estructura para los segmentos fluviales contenidos en cada cuenca.
- Atributos descriptivos que crean un sistema interconectado de segmentos fluviales aguas arriba y aguas abajo entre cuencas.
- Una estructura de base de datos en SQLite, para poblar y adjuntar atributos adicionales específicos al modelo.

*“La AHD utiliza un modelo de base de datos vectorial en las que los atributos están representados como puntos, líneas y polígonos e incluye las relaciones entre caudales aguas arriba y aguas abajo como atributos, estando la conectividad del sistema hidrográfico codificado en la data, y los datos se derivan principalmente de un único conjunto de datos de elevaciones. Los segmentos fluviales y los correspondientes cauces contenidos en la AHD se desarrollan a través de un algoritmo automatizado utilizando solamente estos datos de elevaciones (BID, 2014)”*. Esto significa que los segmentos fluviales son derivados y no están necesariamente ubicados en los sitios o con la magnitud espacial real, tal como ocurrirían en un mapa o imagen satelital, hecho que se pone en manifiesto cuando ha de existir intervenciones del hombre, por ejemplo, mediante la construcción de urbanizaciones, presas y embalses.

Los segmentos fluviales y cuencas hidrográficas desarrolladas proveen una base para incluir otros atributos de corrientes o cuencas, como podrán ser datos climáticos, usos de la tierra, propiedades del suelo, calidad de agua, y carga de sedimentos.

Además de la AHD el Sistema HydroBID incluye lo siguiente:

- Una herramienta de navegación basada en un sistema de información geográfica para seleccionar cuencas y corrientes de la AHD aguas arriba y aguas abajo;
- Una interfaz de usuario para determinar específicamente el área y el periodo de tiempo a ser simulado y la ubicación donde la disponibilidad de agua será simulada;
- Una interfaz de datos climáticos para generar y aplicar entradas de precipitación y temperatura para el área y el período de interés;
- Un modelo de precipitación - escorrentía basado en el Factor de Carga de Cauces Generalizados (GWLF, por sus siglas en inglés); y
- Un esquema de cálculo hidráulico (routing) para cuantificar el tiempo de tránsito y los estimados de flujos a través de las cuencas aguas abajo.

HydroBID genera salidas de información en forma de series de tiempo diarias de los flujos estimados para la localidad y el período escogido.

## 2.5. El caso de estudio

El propósito de este Trabajo de Fin de Máster es ilustrar sobre la aplicación del modelo HydroBID a un reto específico de manejo de recursos hídricos en el Uruguay, con la intención de mostrar el proceso de aplicación del modelo a una cuenca específica, incluyendo lo siguiente:

- Formulación de los objetivos de la aplicación
- Perfil del área del caso de estudio
- Hidrología superficial
- Clima actual y futuro
- Demanda de agua actual y futura
- Parametrización y calibración del modelo
- Evaluación de situación actual y futura de la disponibilidad de agua

Los factores que se considerarán a la hora de generar escenarios futuros serán:

- La instalación en los próximos años de una planta de producción de pasta de celulosa con capacidad 2.000.000 de toneladas por año en la cercanía a Paso de los Toros.

A continuación, se transcribe los compromisos asumidos contractualmente por el estado uruguayo con la empresa que llevará adelante el proyecto en lo referente al agua.

*“Conceder u obtener la concesión de derechos de uso del agua para los procesos industriales asociados al Proyecto de Planta de Celulosa, así como el área del álveo requerida para instalar el equipo necesario, que sea debidamente solicitado por UPM de acuerdo con la normativa vigente...*

*El estado establecerá un flujo mínimo en el Río Negro aguas debajo de la Represa del Gabriel Terra (www.upm.com.uy, 2019)”.*

- Cambios en el uso del suelo en la cuenca, provocadas por tal emprendimiento que significará la plantación de eucaliptus para su abastecimiento.
- Los efectos producidos por la variabilidad introducida como consecuencia en el cambio climático.

#### 2.5.1. Objetivo General

***Realizar un modelo hidrológico empleando el software HydroBID cuya aplicación será en la cuenca alta del Río Negro, Uruguay.***

#### 2.5.2. Objetivos específicos

- Parametrizar y validar el modelo
- Analizar los efectos que puede introducir el cambio climático en la aportación de agua.
- Analizar la disponibilidad de agua para satisfacer las demandas que se prevén introducir en un futuro.

### 2.6. Descripción general de la cuenca

La extensión de la cuenca del Río Negro se ha calculado en 75.000 km<sup>2</sup>. Este río tiene la particularidad de dividir al Uruguay en dos regiones, definiendo típicamente el Norte y el Sur del país. El Río tiene una extensión de 750 km, naciendo en territorio brasilero, y recorriendo el Uruguay de este a oeste para desembocar en el Río Uruguay. Por tal motivo es de considerarse esta cuenca como una subcuenca de este último. En su recorrido el río se caracteriza por numerosos meandros, y sus principales afluentes son el Río Tacuarembó y Río Yi.

La subcuenca en estudio, que se muestra en la Figura 1 pertenece a la denominada cuenca “alta” del Río Negro, y se distingue del resto de la cuenca por ser el área de captación que vierte sus aguas a cabecera del embalse Gabriel Terra. Esto sucede donde desemboca el Río Tacuarembó en el Río Negro, con un área total de drenaje que ha de estimarse en 30.000 km<sup>2</sup>.

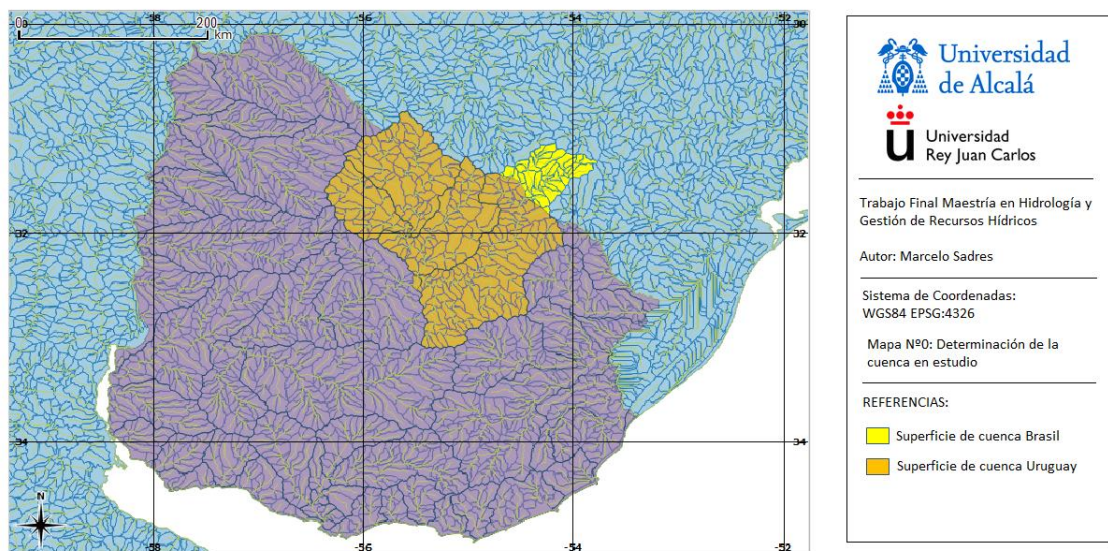


Figura 1: Delimitación de la cuenca en estudio.

#### 2.6.1. Características topográficas y geológicas

El territorio uruguayo se caracteriza por ser una penillanura suavemente ondulada, cuya altitud media es de 116,7 m. En ningún caso las elevaciones superan los 520 metros sobre el nivel del mar. Al norte la Cuchilla de Haedo es divisoria entre los cursos de agua que drenan hacia el Río Uruguay y los que lo hacen hacia la cuenca del Río Tacuarembó. La Cuchilla Grande localizada al sureste, también define cauces de agua que drenan hacia el Río Negro.

Como se aprecia en la Figura 2, deben considerarse también aportes que suceden en el nacimiento del río que ocurre en territorio brasileiro, más precisamente en el Estado de Río Grande del Sur, en el denominado nudo orográfico de Santa Tecla. A la porción del río que sucede del lado brasileiro se le suele denominar Río Negro Oriental. En esta región también nacen el Río Yaguarón y el Río Santa María que drenan hacia la Laguna Merín y el Río Ibicuí (este es un afluente del Río Uruguay en su nacimiento). Por tanto, a pesar de ser una



zona de mayor altitud, la extensión de la cuenca asociada al Río Negro en el territorio brasilero no es tan significativa considerando el desarrollo posterior del cauce.



Figura 2: Alturas topográficas en la región de la cuenca. Adaptado de <http://es-es.topographic-map.com>

Con respecto a la geología teniendo en cuenta los aspectos geológicos y de paisaje como rasgos principales históricamente se ha reconocido en el Uruguay nueve regiones como se muestra en la Figura 3, de la cuales en la parte la parte alta de la cuenca del Río Negro podemos encontrar las siguientes:



Figura 3: Mapa esquemático de regiones geológicas del Uruguay. Tomado de *Regiones Geológicas del Uruguay*, Bossi, 2007.

- Región 2: Corresponde al precámbrico moderno, siendo un relieve ondulado fuerte, con elevada pedregosidad y abundancia de suelos superficiales.
- Región 4: Abarca las rocas sedimentarias vinculadas a los depósitos continentales y de borde marino acumuladas desde el devónico anterior hasta



el Jurásico. Dominan las areniscas y pelitas, pero existen también otros tipos de rocas sedimentarias.

- Región 5: Estas unidades contienen rocas basálticas del Cretácico tardío y el Paleógeno. Incluye basaltos de grano finos y gruesos, suelos profundos, litosoles, brunosoles, y vertisoles.

En lo que refiere a la hidrogeología ha de distinguirse en el área de estudio zonas acuíferas en rocas con porosidad por fracturas, acuíferos en sedimentos consolidados y no consolidados, con porosidad intersticial y buena posibilidad para extraer agua subterránea, y unidades acuíferas improductivas o con baja posibilidad, relacionadas con formaciones ígneas, metamórficas y sedimentarias con escasa capacidad de transmitir agua. Se destaca al oeste de la región analizada la presencia de una zona aflorante del Acuífero Guaraní. (Heinzen et al., 2003).

#### 2.6.2. Usos del suelo

La Figura 4 muestra un mapa de uso de suelo en el país, donde se puede visualizar e interpretar las actividades fundamentales que ocurren en la cuenca en estudio. Predomina como paisaje la pradera natural para pastoreo de ganado vacuno, con leve presencia de zonas empleadas para el cultivo del arroz (se visualizan en el mapa como cultivos en regadío), forestación, y monte natural o nativo. Las zonas urbanas e industriales, si bien no son de extensión considerable deben tenerse en cuenta al ser zonas de particular presión antrópica. Las únicas ciudades cuya población es mayor a 10.000 personas y que se encuentran en la cuenca en estudio son Tacuarembó y Rivera.

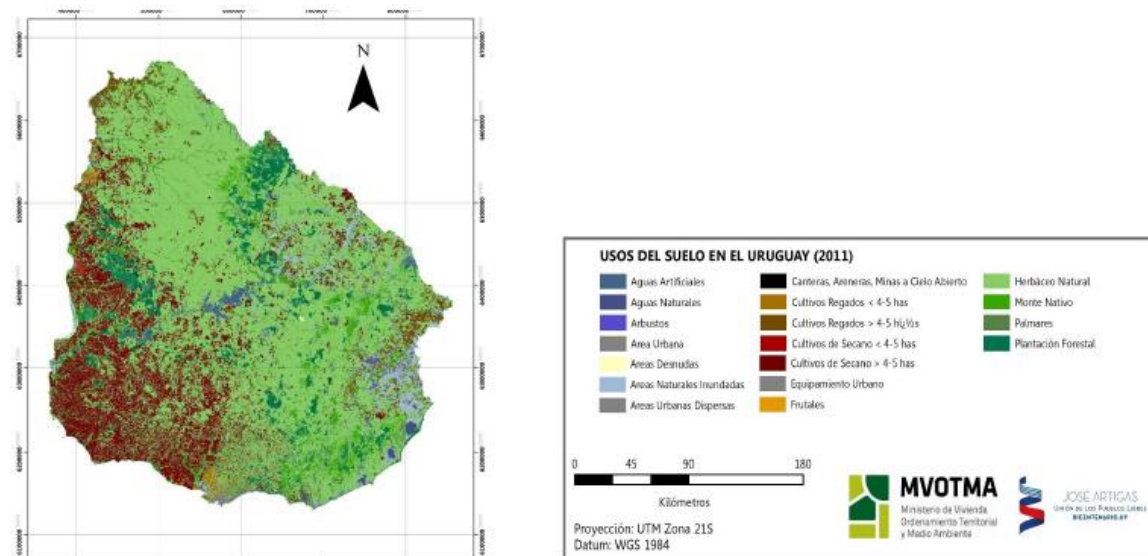


Figura 4: Cobertura del suelo en Uruguay. Tomado de Cambio de uso de suelo y degradación de ecosistemas naturales, MVOTMA, 2016.

### 2.6.3. Climatología

La temperatura media anual en la región en estudio se sitúa entre los 17 y 18 °C, con un gradiente incremental de sureste hacia noroeste. Las temperaturas más altas se presentan en enero y febrero pudiendo alcanzar valores de hasta 36°C, y las más bajas ocurren en junio y julio, donde pueden ocurrir temperaturas de algún grado bajo cero.

De forma general las precipitaciones anuales varían entre los 1000 y 1500 mm. En términos interanuales el régimen de precipitaciones es muy variable, con cierta alternancia de años húmedos y secos.

La evapotranspiración se estima con valores anuales medios que se sitúan en el entorno de 1000 a 1200 mm. Presenta marcada variación estacional, con valores más altos durante el verano, situados entre 160 y 185 mm/mes, y más bajos en invierno, entre 25 y 35 mm/mes (MVOTMA, 2017).

### 2.6.4. Generación Hidroeléctrica

El aprovechamiento hidroeléctrico del Río Negro a partir del potencial hidráulico de su cuenca ha sido una de las principales fuentes de generación de energía eléctrica renovable del país. El mismo lo integran tres saltos hidráulicos: la presa y central Hidroeléctrica Dr. Gabriel Terra, y ubicadas aguas debajo de esta, sus similares Rincón de Baygorria y Constitución. A continuación, se ilustra las cuencas involucradas para cada represa, su ubicación territorial y las características de los embalses. La Figura 5 muestra el área de cuenca que ha de servir a cada uno de los embalses.

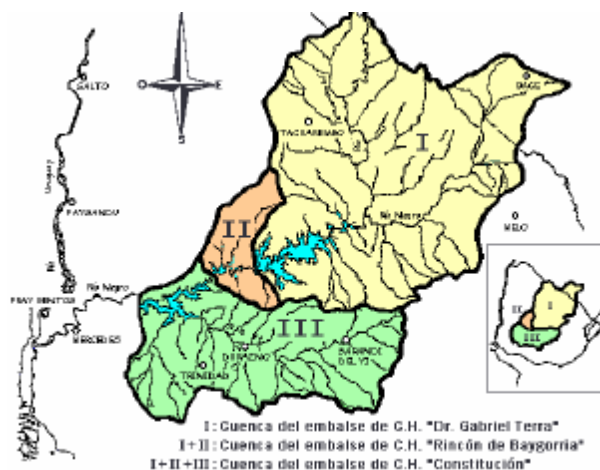


Figura 5: Área que sirve a cada una de las presas del Río Negro. Tomado de Aprovechamiento hidroeléctrico del Río Negro, UTE, 2008

Los embalses son administrados por la empresa de generación eléctrica nacional, siendo esta de propiedad estatal. El siguiente cuadro (Tabla 1), resume las características de estos.

Tabla 1: Características de los embalses. Tomado de Aprovechamiento hidroeléctrico del Río Negro, UTE, 2008

Embalse	Gabriel Terra	Baygorria	Constitución
Cuenca total	40.460 km <sup>2</sup>	44.381 km <sup>2</sup>	63.219 km <sup>2</sup>
Cuenca parcial	40.460 km <sup>2</sup>	3.921 km <sup>2</sup>	18.838 km <sup>2</sup>
Volumen total	8.864 Hm <sup>3</sup>	570 Hm <sup>3</sup>	2.850 Hm <sup>3</sup>

#### 2.6.5. Toma de aguas superficiales

A continuación, se muestran las tomas de aguas superficiales en el área de estudio, considerando la superficie de la cuenca dentro del territorio uruguayo. La Figura 6 muestra aquellas que son utilizadas para el suministro de agua potable por la empresa estatal, mientras que la Figura 7 aquellas tomas y pequeños embalses empleados para la producción agrícola ganadera, fundamentalmente para el regadío de arroz, y cereales.

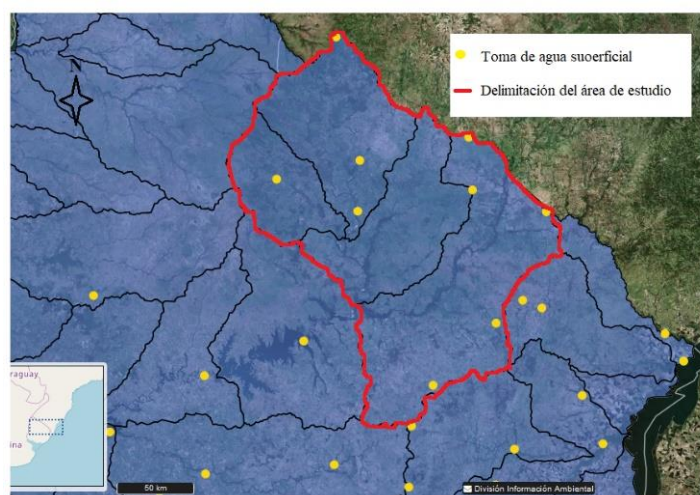


Figura 6: Toma de aguas superficiales para el abastecimiento de agua potable. Adaptado de Sistema de Información Ambiental, DINAMA

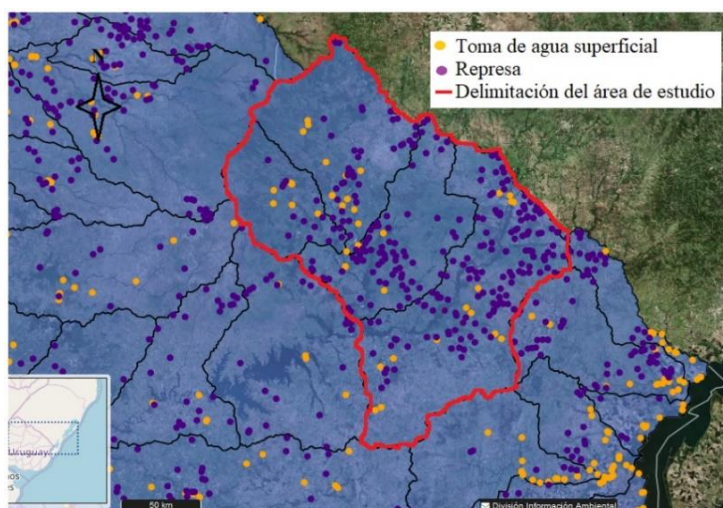


Figura 7: Toma de aguas superficiales para usos distintos al suministro de agua potable. Adaptado de Sistema de Información Ambiental, DINAMA.

#### 2.6.6. Efectos en el ciclo del agua por la implantación de la planta de celulosa

Los efectos en el ciclo hidrológico por la implantación de una planta de producción de pasta de celulosa pueden manifestarse al menos por lo siguiente:

- La propia demanda de agua del emprendimiento productivo, así como la calidad del retorno de sus efluentes.
- El consumo adicional de agua por las nuevas plantaciones de eucaliptus en las adyacencias de la planta, para abastecerla de materia prima.

En lo que refiere al primer punto en el Documento de Viabilidad Ambiental de Localización presentado por la empresa y de carácter público se menciona que la planta tomará en promedio 125.000 m<sup>3</sup>/día de agua bruta. Así mismo mencionan que la planta se instalará aguas debajo del embalse Gabriel Tierra, y a través del efecto regulador del mismo se le asegura a la industria el caudal requerido para los procesos industriales.

En lo que refiere a las plantaciones de eucaliptus este mismo documento indica, que como consecuencia del proyecto se ha de aumentar el área forestada en el entorno de 60.000 a 90.000 hectáreas en sus cercanías.

### 2.7. Marco Reglamentario sobre caudales ambientales

El presente apartado hace mención de como este trabajo y los objetivos que persiguen se alinean con la nueva legislación que se viene desarrollando en el Uruguay. Esto tanto para que se utilice como una herramienta válida para determinar y/o calcular caudales ambientales, así como en la asignación de los recursos. De acuerdo a los criterios establecidos por la norma y que se apuntarán a continuación, el estudio aquí realizado podrá ser entonces un caso práctico en la determinación de los caudales mínimos requeridos en los distintos segmentos fluviales de la cuenca, así como utilizarse para evaluar la asignación de recursos en escenarios futuros.

Es mediante el Decreto 368/018 del 13 de noviembre de 2018 (Diario Oficial, 2018) que se propone reglamentar el caudal ambiental que los distintos usos de las aguas deben observar, como instrumento de gestión estableciendo la cantidad y calidad de las aguas necesarias para sostener los valores del ecosistema y el bienestar humano, teniendo en cuenta que la primera prioridad es asegurar el adecuado abastecimiento de agua potable a poblaciones.

El decreto en su artículo tercero indica que se entenderá por caudal ambiental, el régimen hidrológico de un cuerpo o curso de agua o sus tramos, necesario para sostener la

estructura y funcionamiento de los ecosistemas correspondientes y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos asociados en la cuenca. Sobre cómo se determinarán estos caudales el Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente a partir de estudios debe determinar los caudales ambientales por cuenca hidrográfica, para lo cual tendrá el plazo de 1 año a partir de la publicación del decreto, así como establecer las guías metodológicas para la determinación, aplicación, control y monitoreo de caudales ambientales en las distintas cuencas.

Mientras esa determinación no sea realizada y de acuerdo al artículo 5, para aquellos cursos o cuerpos de agua superficiales y permanentes o para tramos de estos, se determinará provisoriamente un caudal ambiental para cada mes del año, en base a una estadística hidrológica de al menos 20 (veinte) años de observaciones con el siguiente criterio:

a) Para las obras de embalse, el caudal con 60% (sesenta por ciento) de probabilidad de excedencia (frecuencia absoluta acumulada) en el mes correspondiente.

b) Para las tomas de agua, el caudal con 80% (ochenta por ciento) de probabilidad de excedencia (frecuencia absoluta acumulada) en el mes correspondiente.

Indica que cuando para un curso o cuerpo de agua superficial determinado no se disponga de información suficiente para aplicar la estadística hidrológica referida, el caudal ambiental se calculará utilizando un modelo de balance hídrico de precipitación-escorrentía.

### 3. Materiales y Métodos

#### 3.1. Funcionamiento del Sistema HydroBID

La Figura 8 muestra una representación esquemática del Sistema integrado Hydro-BID para una simulación cuantitativa de hidrología y cambio climático. El Sistema se construye sobre la Base de datos de Hidrología Analítica (AHD) para las regiones de América Latina y el Caribe.

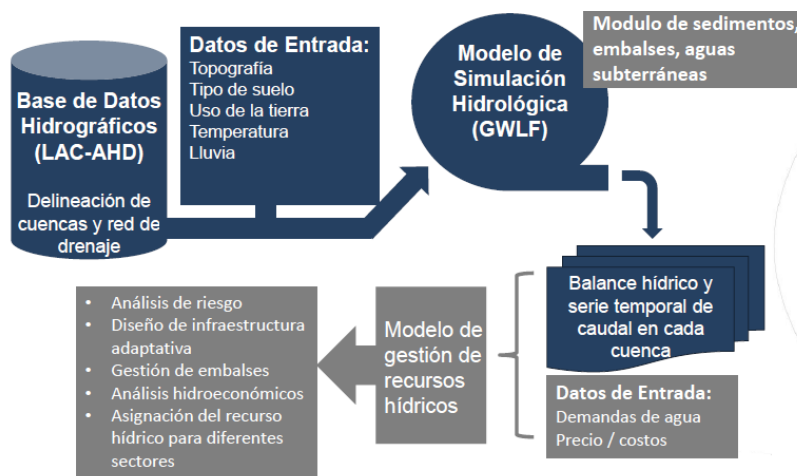


Figura 8: Representación esquemática del funcionamiento de HydroBID, tomado de BID 2014

El Sistema aplica el modelo standard Factor de Carga de Cauces Generalizados - (GWLF, por sus siglas en inglés) en conjunto con una metodología de tiempo de retardo-enrutamiento (lag-routing). La salida se genera como una serie de tiempo de proyecciones de flujos de agua, en escala diaria o mensual.

El modelo de precipitación-escorrentía componente de GWLF toma en consideración los usos de tierras y las condiciones del suelo dentro de la cuenca. La respuesta a cada uso de tierra en una cuenca dada es tratada por separado para generar un volumen de escorrentía estimado. El flujo que se genera de cada cuenca, incluyendo las contribuciones de aguas subterráneas poco profundas o flujo base, se dirige a través de las redes de corrientes definidas por la AHD. Los impactos del cambio climático en recursos hídricos pueden ser simulados en escalas tan pequeñas como una cuenca individual AHD o a través de todas las áreas de captación de una cuenca entera. La Figura 9 es una representación conceptual de una cuenca de captación con capas de suelo saturadas y no saturadas tal como se utiliza en GWLF.



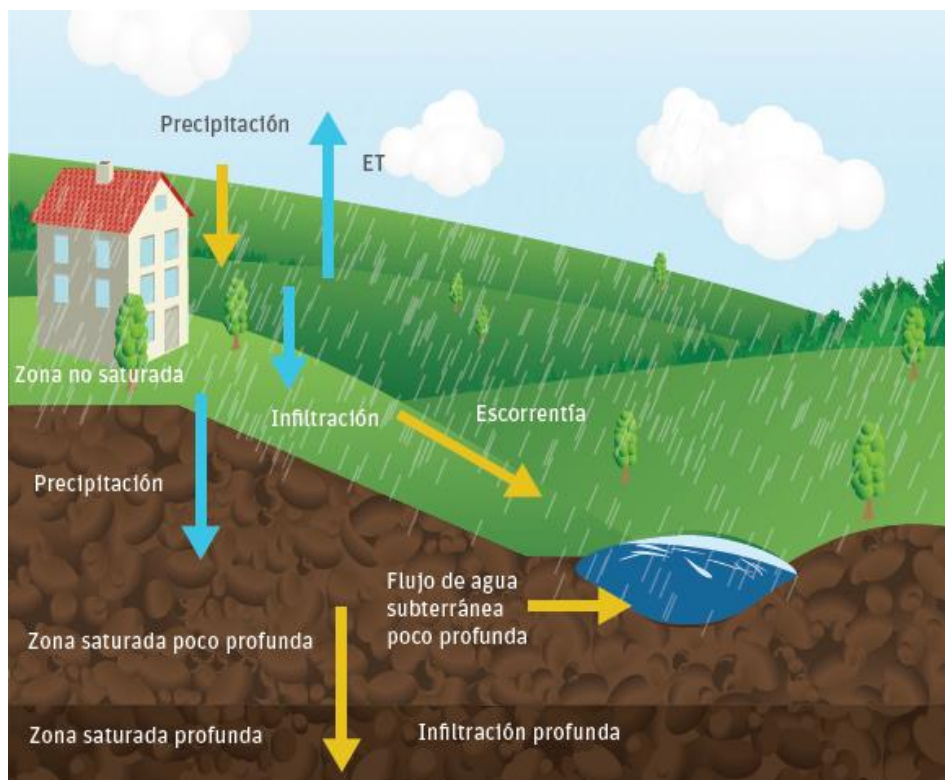


Figura 9: Representación conceptual del modelo que utiliza el GWLF. Tomado de Nota Técnica Hydrobid

El modelo calcula la escorrentía y los flujos base por cuenca de captación: la escorrentía se genera en forma de exceso de infiltración y el flujo base es una liberación gradual de la capa saturada. Tras tomar en cuenta la escorrentía proveniente de las precipitaciones, toda agua que excede un volumen calculado de evaporación se infiltra a la capa no saturada. Con el tiempo, el agua infiltrada se pasa desde la capa no saturada hacia abajo para reponer el volumen almacenado de la capa saturada. El agua de la capa saturada entra en el canal de corriente como flujo de base donde se combina con la escorrentía de la cuenca y otros flujos de entrada provenientes de las cuencas de aguas arriba para proporcionar el volumen de flujo de corriente para el día. Cabe destacar que la capa saturada, o agua disponible como flujo de base, puede agotarse por medio de la filtración a un acuífero subterráneo más profundo.

### 3.2. Cálculos del Modelo del GWLF

Esta sección describe las ecuaciones que se utilizan para calcular cada componente del modelo; evapotranspiración potencial, escorrentía, percolación, flujo y tránsito.

#### 3.2.1. Evapotranspiración potencial

El GWLF utiliza el método de estimación de la evapotranspiración potencial (PET) desarrollado por Hamon (1962), que utiliza la temperatura media y el número de horas de luz diaria, de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$PET_t = \frac{0.021 H_t^2 e_t}{T_t + 273}$$

Donde  $H_t$  es el número de horas de luz solar por día durante el mes que contenga el día  $t$ ,  $e_t$  es la presión de vapor de agua en saturación en milibares en el día  $t$  y  $T_t$  es la temperatura en el día  $t$  expresada en grados Celsius. La presión de vapor de agua y el número total de horas de luz solar se calculan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$e_t = 33.8639 [(0.00738T_t + 0.8072)^2 - 0.000019(1.8T_t + 48) + 0.001316]$$

$$H_t = \frac{2 * \cos^{-1}[-\tan \delta + \tan \Phi]}{\omega}$$

Aquí  $\delta$  es la declinación solar en radianes  $\Phi$  es la latitud geográfica en radianes  $\omega$  es la rotación angular de la tierra.

La PET se ajusta entonces en base al uso de tierras/suelos y condiciones de la cobertura utilizando un factor de cobertura.

$$PET_{adj,t} = CV * PET_t$$

Siendo CV el factor de cobertura que dependen de la cobertura vegetal y de cultivos. La evapotranspiración real es calculada de la PET de cobertura ajustada, pero está limitada por la disponibilidad de agua en la humedad del suelo.

### 3.2.2. Escorrentía

La escorrentía superficial generada por la lluvia se calcula usando la ecuación del número de curva del U. S. Soil Conservation Service:

$$RO_t = \left( \frac{R_t - 0.2D_t}{R_t + 0.8D_t} \right)^2$$

Donde  $RO_t$  es la escorrentía en cm,  $R_t$  es la lluvia y  $D_t$  el parámetro de detención calculado como sigue:

$$D_t = \frac{2540}{CN_t} - 25.4$$

$CN_t$  es el número de curva asignado por uso de suelo y ajustado cada día. Los números de curva son asignados a cada categoría individual de uso de suelos y al grupo hidrológico del suelo correspondiente considerado en el modelo. Por ejemplo, los usos de las tierras de áreas de bosques que yacen sobre suelos de buen drenaje tendrán un número de curva diferente que el mismo uso de tierras que las que yacen sobre suelos de pobre drenaje. Aunque los números de curva están establecidos dentro del modelo antes de correr el modelo, cada día el número de curva para un uso de tierras y grupo de suelos es modificado en base a la condición de humedad antecedente del suelo.



### 3.2.3. Percolación

Se calculan los balances diarios de agua dentro de ambos compartimientos del suelo. La ecuación para la capa no saturada es como sigue:

$$U_{t+1} = U_t + R_t + M_t - Q_t - E_t - P_t$$

En forma similar, el balance de agua para el área saturada se calcula como:

$$S_{t+1} = S_t + P_t - G_t - D_t$$

En la ecuación anterior,  $U_t$  y  $S_t$  son las humedades del suelo de las zonas no saturada y la zona de poca profundidad en el comienzo del día  $t$ , y  $Q_t$ ,  $E_t$ ,  $P_t$ ,  $G_t$  y  $D_t$  son la esorrentía de la cuenca, la evapotranspiración real, la percolación hacia la zona saturada poco profunda, el flujo/volumen de aguas subterráneas hacia el arroyo (i.e., flujo base), y la infiltración hacia la zona saturada profunda, respectivamente, en el día  $t$  (cm).

La percolación ocurre cuando el agua en la zona no saturada sobrepasa la capacidad disponible de agua del suelo  $U^*$  (cm):

$$P_t = \text{Max} (0, (U_t + R_t + M_t - Q_t - E_t - U^*))$$

La capacidad de agua del suelo  $U^*$  tiene que ser definida como una característica de la capa de suelo no saturada. Este parámetro puede estimarse a partir de esta propiedad del suelo.

La evapotranspiración está limitada por la humedad disponible en la zona no saturada:

$$E_t = \text{Min} (CV_t * PET_t, (U_t + R_t + M_t - Q_t))$$

Tal como en Hann (1972), la zona saturada poca profunda es simulada como un embalse lineal simple. El flujo/volumen de agua subterránea y la infiltración profunda se calculan de la manera siguiente:

$$G_t = rS_t$$

$$D_t = sS_t$$

donde  $r$  y  $s$  son las constantes de recesión de agua subterránea y de percolación, respectivamente ( $\text{día}^{-1}$ ).

### 3.2.4. Flujo

El flujo total generado por la cuenca de captación,  $F_t$ , es la suma de la esorrentía ( $RO_t$ ) y del flujo de agua subterránea ( $G_t$ ).

$$F_t = RO_t + G_t$$

### 3.3. Recopilación de los datos

#### 3.3.1. Número de Curva

Se requieren dos conjuntos de datos para establecer el Número de Curva: el uso del suelo y los datos del tipo de suelo, definiendo esto últimos las características hidrológicas de este.

#### 3.3.2. Datos de cobertura del suelo

Los datos de la cobertura terrestre dividen la superficie en diferentes tipos de coberturas. La cobertura terrestre en cada celda (grid) se indexa a las cuencas de la AHD para proveer el área, de acuerdo a 24 tipos en que se clasifican. Los datos usados se obtienen del United States Geological Survey (USGS) caracterización Global de tierras, y vienen en la base de datos proporcionada por HydroBID.

#### 3.3.3. Datos de tipo de suelo

Los datos que se utilizan se obtienen de la Base de Datos Mundial de Suelos Armonizada (HWSD), por sus siglas en inglés. Esta contiene información actualizada de suelos, con la escala 1:5.000.000 del Mapa Digital Mundial de Suelos de la FAO-UNESCO (Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación- Organización de la Naciones Unidas para la educación la ciencia y la cultura). La capa de los datos del suelo se sobrepone a las cuencas de la AHD para determinar el tipo de suelo dominante en la cuenca. Entonces, el tipo de suelo dominante se clasifica con un grupo hidrológico de suelo basado en la clasificación del United States Department of Agriculture (USDA) lo que determina la propiedad de drenaje del suelo. Hay cuatro tipos de grupos hidrológicos de suelos: A, B, C y D. El tipo A corresponde al suelo con alta filtración y el tipo D corresponde a suelos con pobre filtración y por lo tanto con tasas de filtración bajas. Los tipos B y C son clases intermedias. Esta información también se incorpora en la base de datos que ofrece HydroBID.

#### 3.3.4. Datos de Precipitaciones y Temperaturas

El proceso de calibración y validación del modelo requiere de una serie temporal y completa de precipitaciones y temperaturas media diarias para cada subcuenca en la que se va a correr el modelo. Esto se consigue a través de la herramienta que incorpora el software y que se denomina “*Climate Data Interpolation*”. Con la misma y a partir de un número de mediciones, en estaciones situadas en la cuenca o en su cercanía, se determina la temperatura y precipitación en cada subcuenca lo que permite calcular el aporte por precipitación y la evapotranspiración.

La Tabla 2, a continuación, resume los datos climatológicos empleados y su fuente.

Tabla 2: Datos meteorológicos utilizados en el estudio.

Estación	Latitud	Longitud	Tipos de dato	Serie de datos	Fuente
Treinta y Tres	-33.2750	-54.1722	Temperatura/ Precipitaciones	T: 01/06/2009 a 31/12/2018 P: 01/01/1995 a 31/12/2018	www.inia.uy
Tacuarembó	-31.7089	-55.8267	Temperatura/ Precipitaciones	01/01/1995 a 31/12/2018	www.inia.uy
Salto	-31.2728	-57.8908	Temperatura/ Precipitaciones	01/01/1995 a 31/12/2018	www.inia.uy
Bagé	-30.8424	-55.6131	Temperatura/ Precipitaciones	T: 01/01/1995 a 31/12/2018 P: 01/01/1995 a 31/12/2000 y 01/01/2002 a 31/12/2018	www.inmet. gov.br
Santa Ana	-31.3478	-54.0133	Temperatura/ Precipitaciones	T: 01/01/2003 a 16/12/2013 P: 01/01/2006 a 31/12/2012	www.inmet. gov.br
Tacuarembó	-31.7194	-55.9847	Precipitaciones	01/01/1995 a 31/12/2018	Informe inédito INUMET
Rivera	-30.9056	-55.5350	Precipitaciones	01/01/1995 a 31/12/2018	Informe inédito INUMET
Melo	-32.3669	-54.1850	Precipitaciones	01/01/1995 a 31/12/2018	Informe inédito INUMET
Durazno	-33.3503	-56.5003	Precipitaciones	01/01/1995 a 31/12/2018	Informe inédito INUMET

### 3.3.5. Datos de caudales

El proceso de calibración y validación del modelo requiere de una serie temporal y completa de caudales, lo que permitirá comparar los resultados obtenidos con el modelo con los observados. Los datos fueron facilitados por la empresa pública que se encarga de la gestionar las represas de generación hidroeléctrica en el río (www.ute.com.uy).

Considerando que existen intervalos temporales o días en que no existe la medida se ha adoptado el siguiente el criterio para los procesos de calibración y validación:

- Considerar la serie temporal en la que se cuenta con mayor cantidad de datos, obtenidos de manera continua para calibrar el modelo.
- Utilizar otros intervalos temporales en los que se cuenta con datos, a efectos de validar los resultados de la calibración.

La tabla 3 que se presenta a continuación resume las estaciones que se han utilizado, así como las series continuadas disponibles en cada caso.

Tabla 3: Estaciones de medición de caudal consideradas en los procesos de calibración y validación del modelo.

Estación	Latitud	Longitud	Intervalos completos mayores a 1 año					
Aguiar	-	32.2850	01/10/1995	27/12/1997	08/12/2007	09/02/2011	20/11/2013	26/10/2017
			a	a	a	a	a	a
			01/10/1997	21/05/2007	08/03/2010	09/11/2013	05/12/2015	31/12/2018
Laguna I	-	32.2504	01/01/1995	14/04/1998	10/02/2004	29/09/2015	13/10/2017	
			a	a	a	a	a	
			25/01/1998	11/05/2002	25/06/2015	27/11/2016	31/12/2018	
M. Díaz	-	31.5280	05/02/1995	26/10/1998	20/12/2006	31/05/2009		
			a	a	a	a		
			16/10/1998	06/01/2005	16/12/2007	31/12/2014		
Pereira	-	32.4434	01/01/1995	07/02/1997	05/12/1998	14/01/2002		
			a	a	a	a		
			04/10/1996	22/10/1998	11/12/2000	02/08/2013		

### 3.4. Calibración del modelo

La calibración de un modelo es el proceso por medio del cual se identifican los valores de los parámetros de este para los cuales la serie de datos simulada se ajusta de mejor manera a la serie de datos observados. El proceso de calibración se enfoca en algún tipo de criterio de exactitud el cual se apoya en la cuantificación de la bondad de ajuste del modelo y puede llevarse a cabo manualmente o automáticamente. El proceso de calibrar un modelo manualmente, como ha de ser en el caso del uso de HydroBID, se realiza por medio de la técnica de ensayo y error, lo cual implica la variación de los parámetros de manera manual y basándose en el criterio del modelador. En la habilidad del modelador estará la capacidad de reconocer cuáles son los parámetros que están influenciando negativamente a la serie simulada y en qué modo pueden ser modificados para alcanzar el criterio de exactitud.

#### 3.4.1. Parámetros del modelo

La tabla 4 que se muestra a continuación indica los parámetros que utiliza HydroBID y que han de tener que ser ajustados en el proceso de calibración del modelo para cada subcuenca considerada. Así mismo se indica el significado de cada uno de ellos, y los valores sugeridos para comenzar el proceso iterativo de prueba y error hasta lograr el ajuste.

Tabla 4: Parámetros utilizado por el software y valores sugeridos para el comienzo del proceso de calibración.

Parámetro	Descripción	Valor sugerido
<b>Número de Curva</b>	Número de Curva, caracteriza el tipo de suelo y la hidrología	1
<b>AWC</b>	Contenido de Agua Disponible (AWC, por sus siglas en inglés), estima la cantidad de agua que puede almacenar un suelo para ser utilizado por las plantas.	1
<b>Coefficiente R</b>	Coefficiente de Recesión, caracteriza como el agua subterránea cerca de la superficie, contribuye a los caudales de los ríos después de un evento de grandes caudales.	0.01 día <sup>-1</sup>
<b>Permeabilidad</b>	Coefficiente de permeabilidad para determinar la infiltración profunda.	0.005 día <sup>-1</sup>
<b>Factor de ET de la estación de cultivo</b>	Factor de evapotranspiración durante la estación que se está cultivando. El periodo de cultivo ha de indicarse con anterioridad, en el setup del programa. Indica aumento adicional de las pérdidas por Evapotranspiración.	1
<b>Factor de ET de la estación de latencia</b>	Factor de evapotranspiración cuando no se está cultivando. Indica una disminución adicional de las pérdidas por Evapotranspiración.	1
<b>Porcentaje de la cobertura impermeable</b>	Porcentaje estimado de la porción impermeable en % de la cuenca.	2%

### 3.4.2. Medidas de bondad del ajuste

**Coefficiente de Calibración (r):** Expresa la dependencia lineal entre dos variables, en este caso los caudales observados y simulados. Se formula como:

$$r = \frac{S_{obs,sim}}{\sqrt{S_{obs}S_{sim}}}$$

Donde  $S_{obs,sim}$  es la covarianza sin sesgo entre los caudales observados y simulados.

$$S_{obs,sim} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}) (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})$$

Y  $S_{obs}$  y  $S_{sim}$  son las varianzas sin sesgo de los caudales observados y simulados respectivamente

$$S_{obs} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2$$

$$S_{sim} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2$$

Los valores con barras representan valores medios y n es el número de datos simulados. El coeficiente de correlación toma valores entre 0 y 1, siendo a mayor valor mejor el ajuste.

**Eficiencia de Nash-Sutcliffe:** Se define de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

Mide cuanto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la tabla 5.

*Tabla 5: Valores de referencia para el criterio de Nash-Sutcliffe*

<b>E</b>	<b>Ajuste</b>
<b>&lt;0.2</b>	Insuficiente
<b>0.2 - 0.4</b>	Satisfactorio
<b>0.4 - 0.6</b>	Bueno
<b>0.6 - 0.8</b>	Muy bueno
<b>&gt;0.8</b>	Excelente

**Volumen del error (%):** Al correr el modelo en el output se indica el porcentaje de error, entre el volumen total calculado por el modelo, y el observado en el periodo considerado. De manera general ha de aceptarse el modelo cuando este se encuentre en el rango +/- 20-40 %.

De igual manera el observar y analizar el porcentaje de error en el volumen total que se muestra en el output tanto anual como mensual, permite conocer si la incidencia de los errores se da de mayor manera en años secos o húmedos, durante la temporada del cultivo o el periodo de latencia, etc.

**Análisis de las herramientas gráficas del output:** El software incorpora herramientas gráficas útiles, que permiten ir determinando si nos estamos acercando a un buen ajuste durante el proceso de calibración. Mediante el gráfico de series temporales se visualiza el caudal diario total para la simulación y los datos observados a lo largo del tiempo. La curva de duración de caudales ilustra el porcentaje de tiempo en que un determinado caudal es excedido para el modelo y los datos observados, lo que indica si las mayores diferencias se están dando en caudales altos o bajos. Por último, el programa gráfica en un par de ejes el dato observado versus el dato que proporciona el modelo, e indica el mejor ajuste lineal que se puede obtener mediante el método de los mínimos cuadrados.

### 3.5. Validación del modelo

Hydrobid no cuenta con una metodología propia capaz de dar solución a la validación del modelo, sino que debe ser el usuario siguiendo una secuencia lógica quien compare los resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo, con los observados en la estación de aforo, en un periodo diferente al empleado en la calibración. La validación de los resultados del modelo se hace a través de la simulación del programa, utilizando para los parámetros, los valores obtenidos en la calibración, para lo cual se introduce un registro de

precipitación de verificación y se compara el hidrograma de salida calculado con el observado para el mismo evento.

### 3.6. Escenarios climáticos

Si bien existe un grado de incertidumbre importante, la comunidad científica ha alcanzado un acuerdo acerca de la evidencia sobre los efectos del cambio climático como consecuencia de la actividad humana, y en particular la emisión de gases de efecto invernadero. Así mismo se vienen desarrollando modelos de escenario climáticos globales y regionales, en base a suposiciones de emisiones futuras, tasas de deforestación, etc. En relación a las temperaturas la mayoría de los modelos coinciden con una tendencia a que se incremente. En el caso de la lluvia el nivel de incertidumbre es mayor, existen regiones en el mundo que, si bien la mayoría de los modelos coinciden en cuanto a la dirección del cambio esperado, los mismos presentan mucha divergencia en cuanto a la magnitud del fenómeno. En el caso de Uruguay la mayoría de los escenarios sostienen un incremento en las lluvias, fundamentalmente en los meses de primavera y verano.

La información utilizada en este análisis es extraída del documento elaborado por el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria del Uruguay, denominado “Cambio Climático del Uruguay, posibles impactos y medidas de adaptación en el sector agropecuario” (INIA, 2009). Se indica que las estimaciones se han realizado en base al ensamble de cuatro modelos climáticos globales (HADCM3, ECHAM4, CSIRO-mk2 y GFDL-R30), forzados con los escenarios socioeconómicos alto y medio, fijados por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático para los escenarios 2020 y 2050, y que se denominan A y B respectivamente. La siguiente tabla resume los resultados a los que llega el análisis para la cuenca en estudio.

*Tabla 6: Escenario climáticos en la cuenca de estudio. A partir de datos de INIA, 2009*

<b>Escenario</b>	<b>A</b>		<b>B</b>	
<b>Año</b>	2020	2050	2020	2050
<b>Temperatura °C</b>	+0.4	+1.3	+0.3	+1.2
<b>Precipitación</b>	+3%	+ 6%	+2%	+5%

A la hora de evaluar cómo se afectará la disponibilidad del recurso como consecuencia del cambio climáticos se considerarán en este trabajo dos escenarios, buscando ser conservador en el análisis y teniendo en cuenta la incertidumbre en las estimaciones, sobre todo cuando se refiere a precipitaciones.

1. Escenario 1: Coincide con el escenario B considerando un incremento en la temperatura media de 1.2 °C y un incremento en las precipitaciones del 5%.
2. Escenario 2; más restrictivo: Considera un incremento en la temperatura media de 1.3 °C, sin que ocurra un incremento de las precipitaciones observadas en la cuenca. Con este escenario se busca conocer la vulnerabilidad de la cuenca a la variabilidad climática.



## 4. Resultados

### 4.1. Subcuenca Estación Aguiar

La estación de medición de caudal Aguiar se ubica en la parte alta de la cuenca del Río Negro, en territorio uruguayo, en la cuenca que se identifica con el COMID 316556000. El área de captación es de 8.044 km<sup>2</sup>. La Figura 10 muestra el área implicada de captación, así como las estaciones meteorológicas consideradas en la calibración-validación.

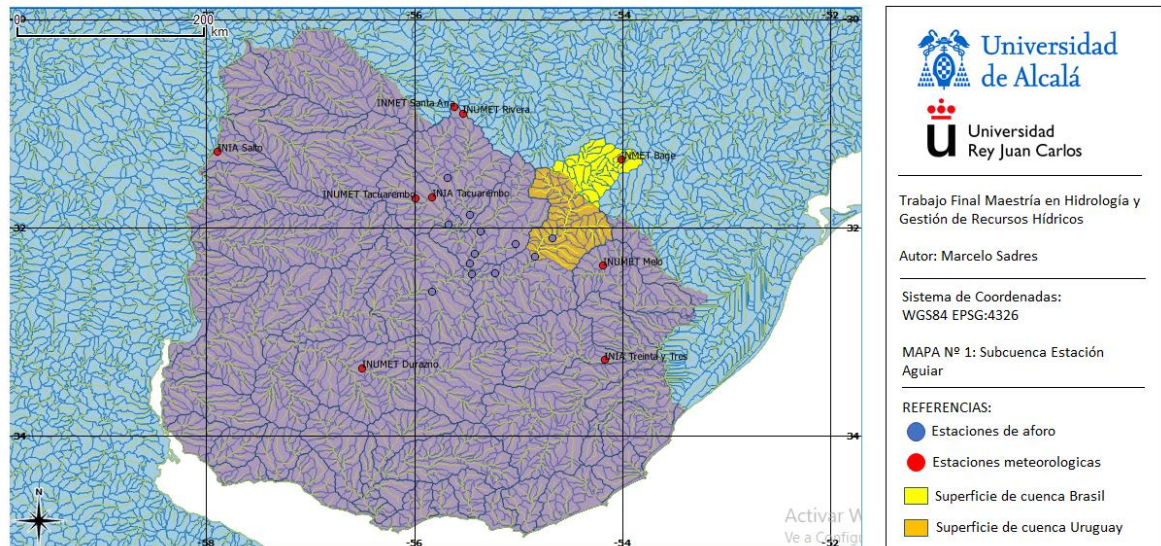


Figura 10: Área de captación subcuenca Estación Aguiar.

#### 4.1.1. Calibración

La calibración se realizó considerando el intervalo 27/12/1997 a 21/05/2007, por ser la serie temporal de la que se cuenta con mayor continuidad de datos de medidas de caudal, obteniéndose los siguientes valores

- Número de Curva: 0.47
- Contenido de agua disponible en el suelo: 0.95
- Infiltración: 0.0635
- Infiltración profunda: 0.0235
- Evapotranspiración en la fase del cultivo: 1.0
- Evapotranspiración en la fase de latencia: 1.0
- Porcentaje de superficie impermeable: 1.0

y los siguientes estadísticos:

- Volumen de error (%): 3.4
- Correlación r: 0.75
- Correlación del modelo: 0.65
- Nash Efficiency: 0.54

A continuación, en la Figura 11 se muestra el gráfico de series temporales de caudales y en la 12 el de mejor ajuste de regresión lineal de los datos observados versus los datos del modelo.

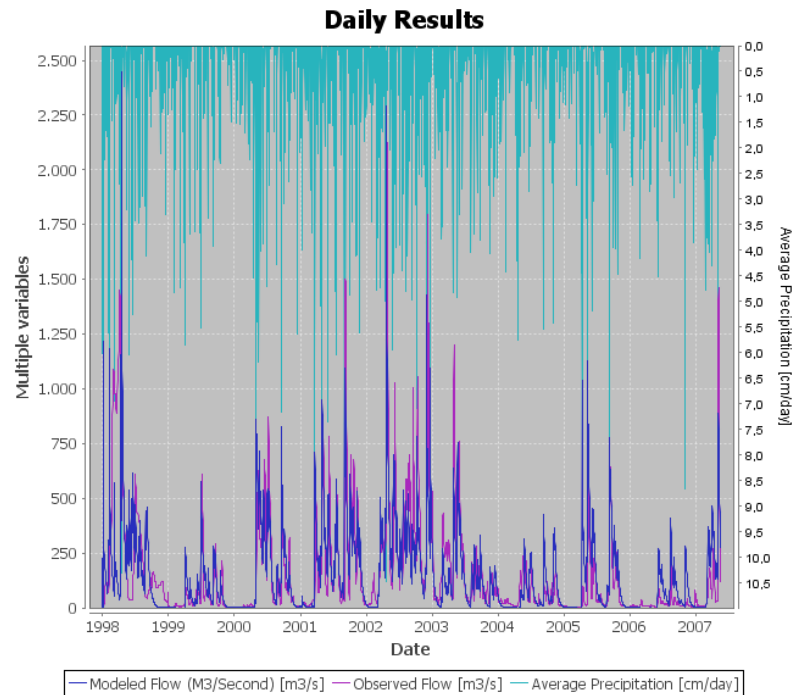


Figura 11: Gráfico de series temporales de caudales para la calibración de Subcuenca Estación Aguiar

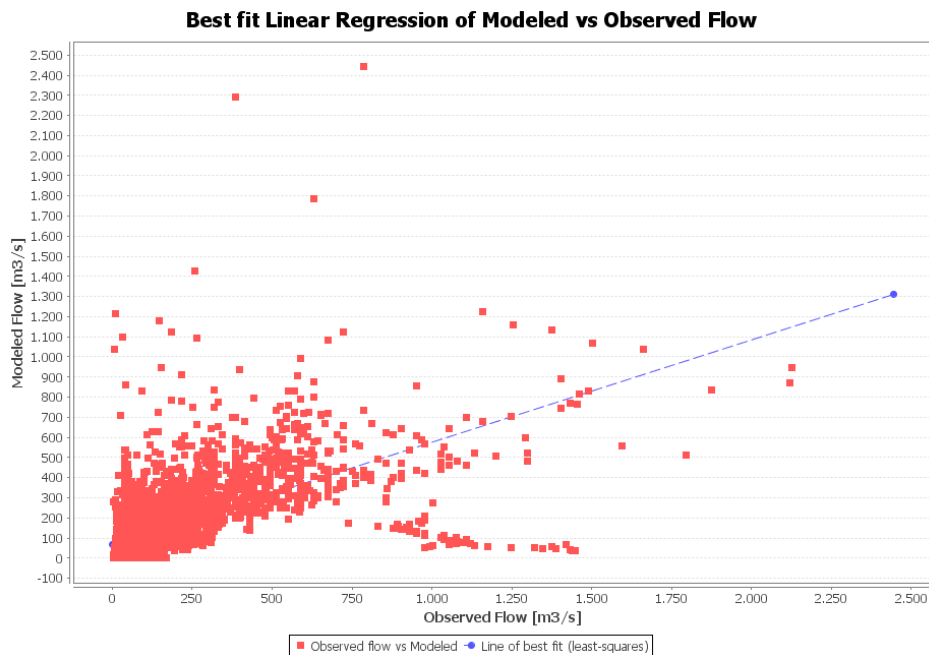


Figura 12: Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal para la calibración de subcuenca Estación Aguiar.

#### 4.1.2. Validación

La validación se realizó utilizando los periodos 08/12/2007 a 08/03/2010 y 20/11/2013 a 05/12/2015 (validación 1 y 2 respectivamente), empleando como valor de los parámetros los hallados en el proceso de calibración. Los resultados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Estadísticos obtenidos en el proceso de validación de la subcuenca Aguiar

Estadístico	Validación 1	Validación 2
Volumen de error %	-0.15	-35.68
Correlación r	0.79	0.73
Correlación del modelo	0.68	0.54
Nash Efficiency	0.63	0.47

A continuación, en la Figura 13 se muestra los gráficos de series temporales de caudales y en la 14 los de mejor ajuste de regresión lineal de los datos observados versus los datos del modelo para ambas validaciones.

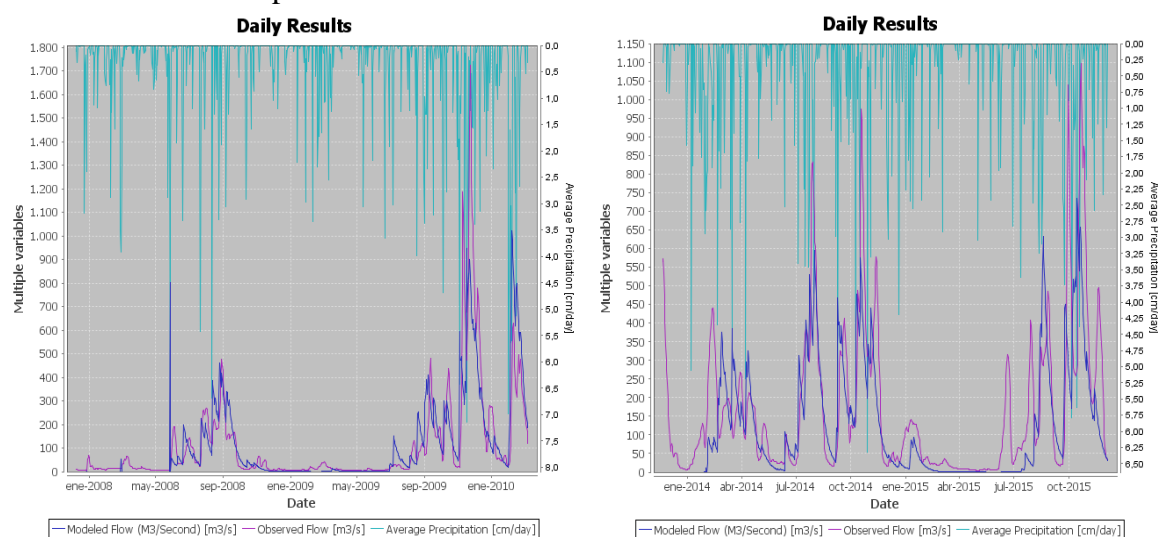


Figura 13: Gráfico de series temporales de caudales para la validación de subcuenca Estación Aguiar (Izq. Val. 1, Der. Val. 2)

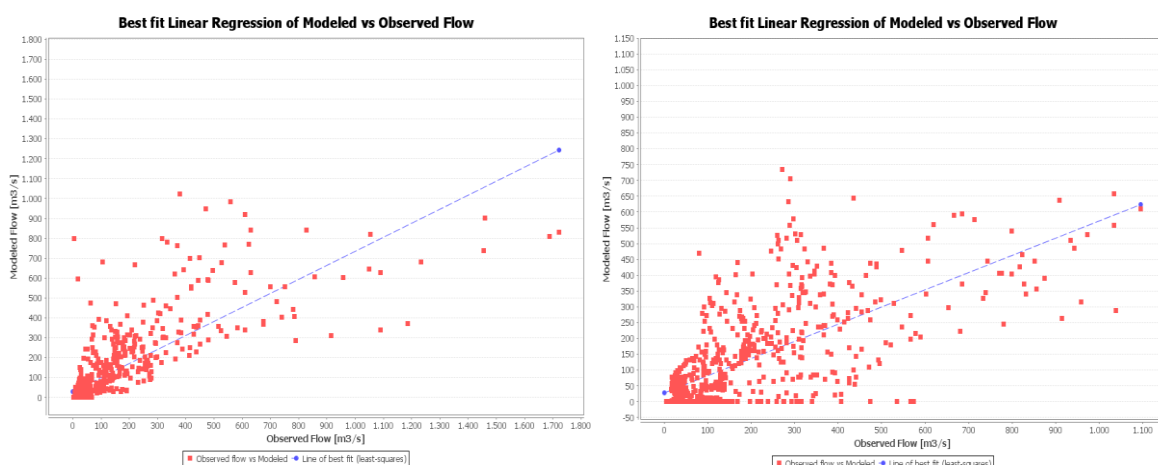


Figura 14: Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal validación de la subcuenca Estación Aguiar (Izq. Val. 1, Der. Val. 2)

## 4.2. Subcuenca Estación Pereira

La estación de medición de caudal Pereira se ubica en la cuenca del Río Negro próximo a cabecera del embalse Gabriel Terra. Esta en la subcuenca que se identifica con el COMID

316589800. El área de captación de la subcuenca es de 11.621 km<sup>2</sup>, perteneciendo a esta también la subcuenca que vierte a la Estación Aguiar. La Figura 15 muestra el área implicada, así como las estaciones meteorológicas consideradas en la calibración-validación.

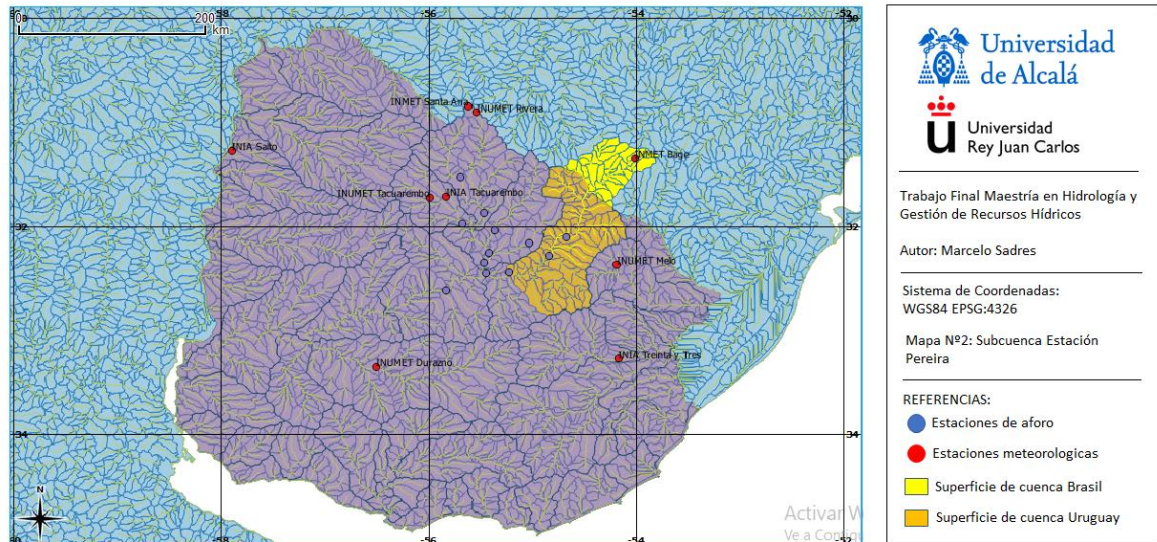


Figura 15: Área de captación subcuenca Estación Pereira

#### 4.2.1. Calibración

La calibración se realizó considerando el intervalo 14/01/2002 a 01/08/2013, por ser la serie temporal de la que se cuenta con mayor continuidad de datos de medidas de caudal, obteniéndose los siguientes valores

- Número de curva: 0.35
- Contenido de agua disponible en el suelo: 0.84
- Infiltración: 0.0900
- Infiltración profunda: 0.0580
- Evapotranspiración en la fase del cultivo: 1.7
- Evapotranspiración en la fase de latencia: 1.0
- Porcentaje de superficie impermeable: 1.0

y los siguientes estadísticos:

- Volumen de error (%): 1.77
- Correlación r: 0.70
- Correlación del modelo: 0.56
- Nash Efficiency: 0.48

A continuación, en la Figura 16 se muestra el gráfico de series temporales de caudales y en la 17 el de mejor ajuste de regresión lineal de los datos observados.

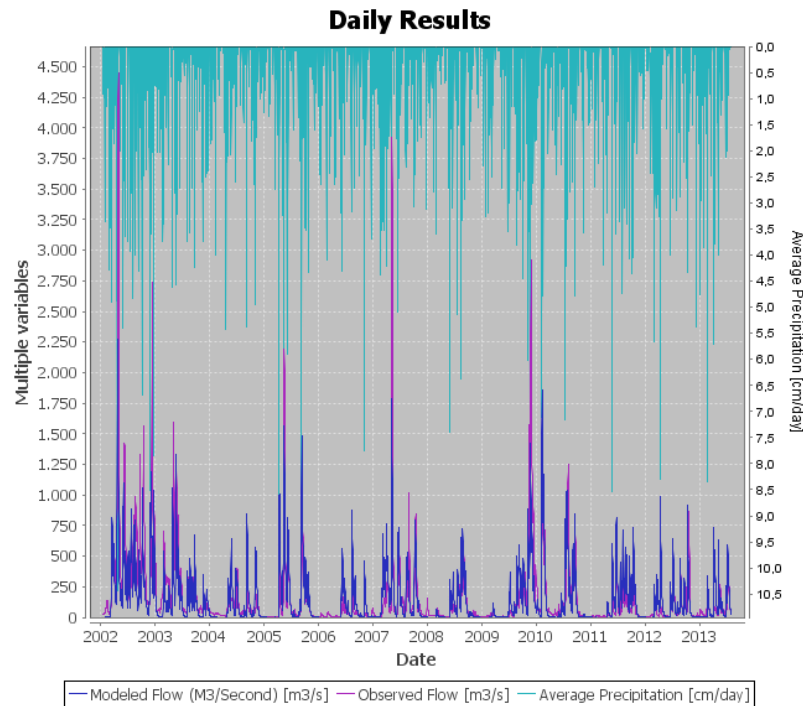


Figura 16: Gráfico de series temporales de caudales para la calibración de subcuenca Estación Pereira

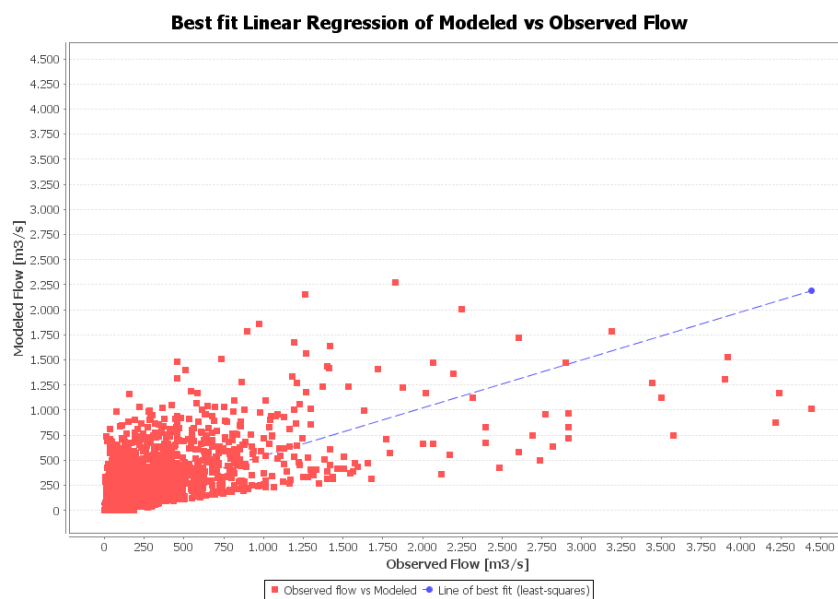


Figura 17: Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal para la calibración de subcuenca Estación Pereira

#### 4.2.2. Validación

La validación se realizó para el período 05/12/1998 a 11/12/2000, utilizando como valor de los parámetros los hallados en el proceso de calibración. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:



- Volumen de error (%): -14.14
- Correlación r: 0.80
- Correlación del modelo: 0.69
- Nash Efficiency: 0.63

A continuación, en la Figura 18 se muestra el gráfico de series temporales de caudales y el de mejor ajuste de regresión lineal de los datos observados versus los datos del modelo para la validación.

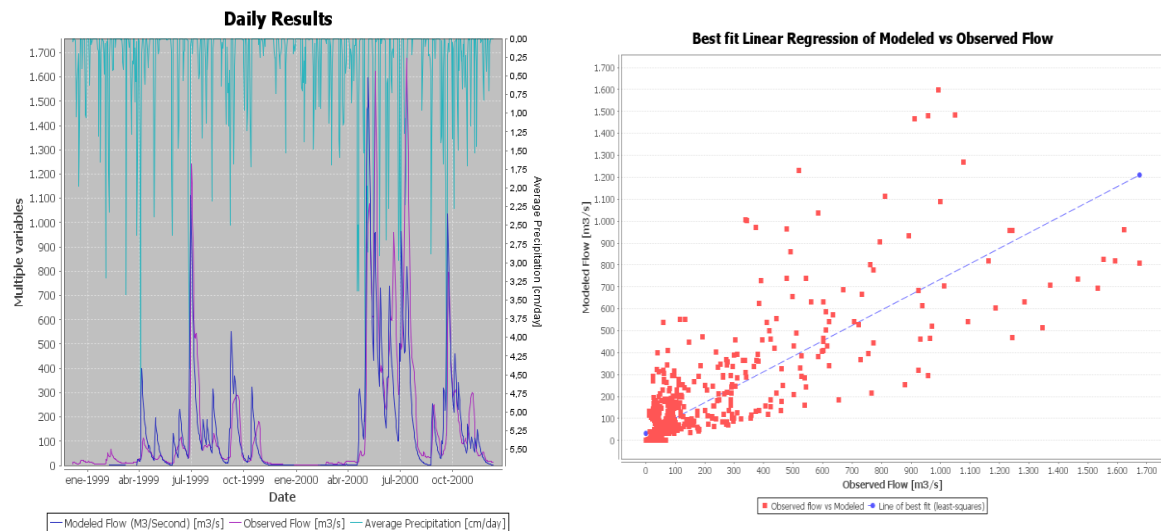


Figura 18: Gráfico de serie temporales de caudales y de mejor ajuste de regresión lineal para la validación de la subcuenca Estación Pereira

#### 4.3. Subcuenca Estación Manuel Díaz

La estación de medición de caudal Manuel Díaz se muestra en la Figura 19 indicando el área de captación implicada, así como las estaciones meteorológicas consideradas.

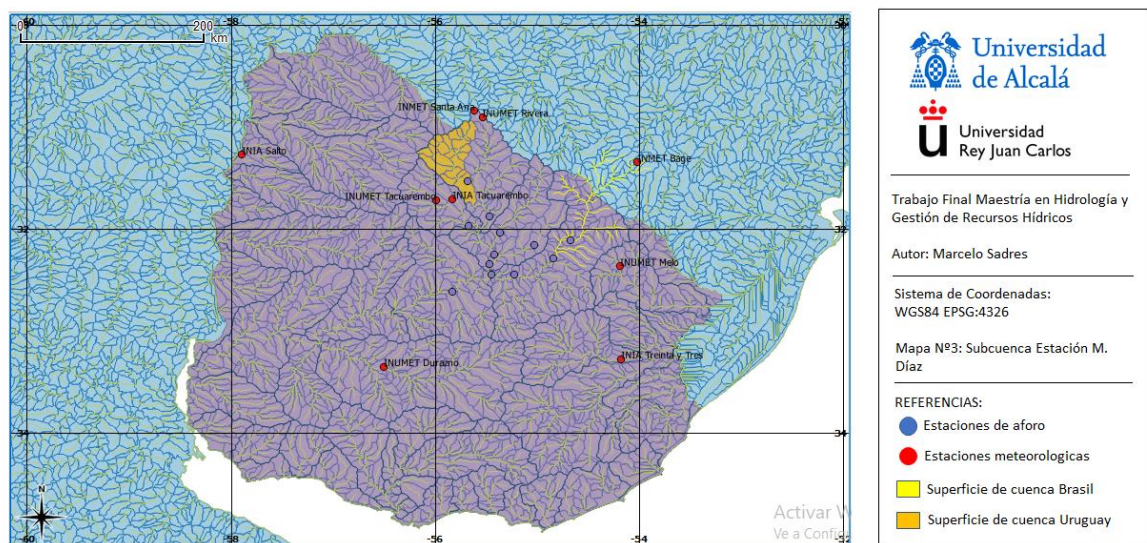


Figura 19: Área de captación subcuenca Estación Manuel Díaz

La subcuenca se ubica en parte alta de la cuenca del Río Tacuarembó en la subcuenca que se identifica con el COMID 316414100. El área de captación es de 2.546 km<sup>2</sup>, ubicados por completo en territorio uruguayo.

#### 4.3.1. Calibración

La calibración se realizó considerando el intervalo 26/10/1998 a 06/01/2005, por ser la serie temporal de la que se cuenta con mayor continuidad de datos de medidas de caudal, obteniéndose los siguientes valores

- Número de curva: 0.70
- Contenido de agua disponible en el suelo: 0.60
- Infiltración: 0.0950
- Infiltración profunda: 0.0380
- Evapotranspiración en la fase del cultivo: 1.3
- Evapotranspiración en la fase de la latencia: 1.1
- Porcentaje de superficie impermeable: 1.0

y los siguientes estadísticos:

- Volumen de error (%): -3.53
- Correlación r: 0.76
- Correlación del modelo: 0.62
- Nash Efficiency: 0.57

A continuación, en la Figura 20 se muestra el gráfico de series temporales de caudales y en la 21 el de mejor ajuste de regresión lineal de los datos observados.

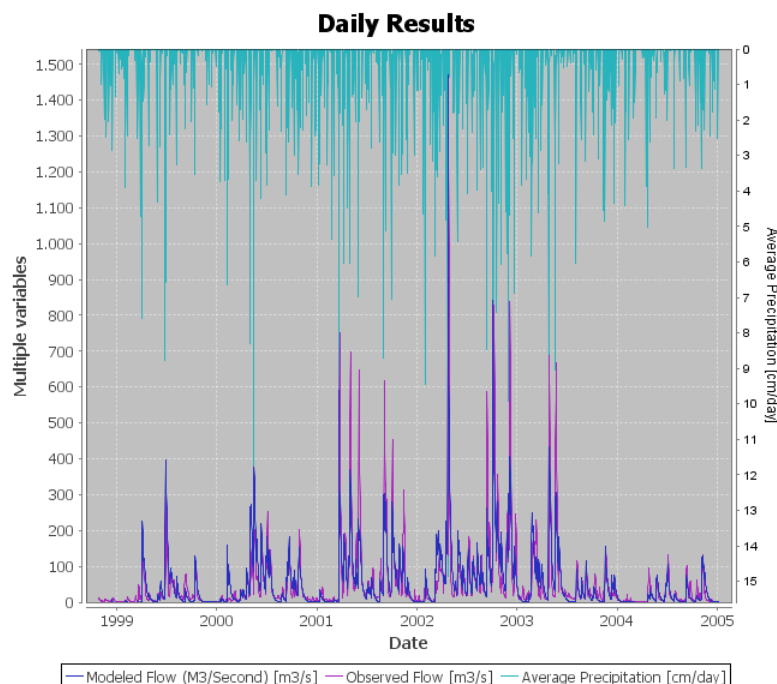


Figura 20: Gráfico de series temporales de caudales para la calibración de subcuenca Estación Manuel Díaz

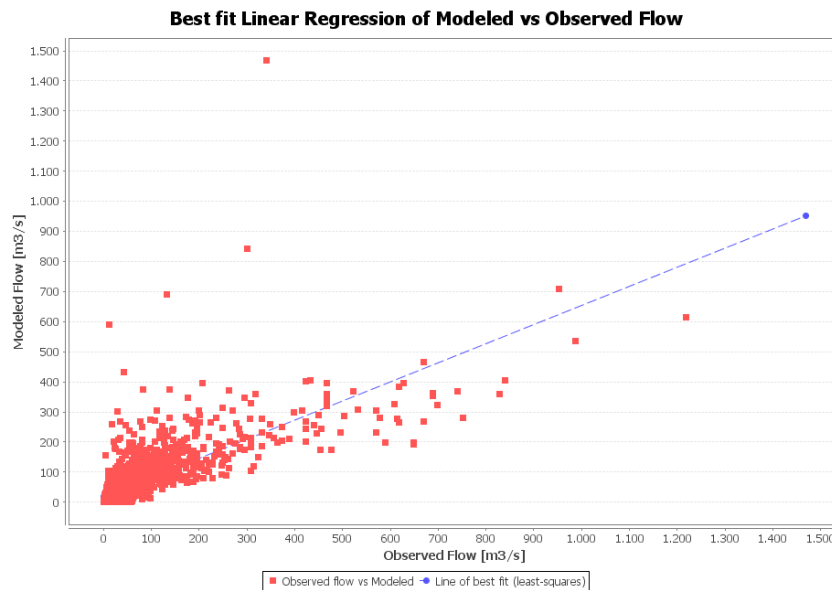


Figura 21: Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal para la calibración de subcuenca Estación Manuel Díaz

#### 4.3.2. Validación

La validación se realizó para el período 31/05/2009 a 3/12/2014, utilizando como valor de los parámetros los hallados en el proceso de calibración. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Volumen de error (%): 33.48
- Correlación r: 0.76
- Correlación del modelo: 0.70
- Nash Efficiency: 0.54

A continuación, en la Figura 22 se muestra el gráfico de series temporales de caudales y el de mejor ajuste de regresión lineal de los datos observados versus los datos del modelo para la validación.

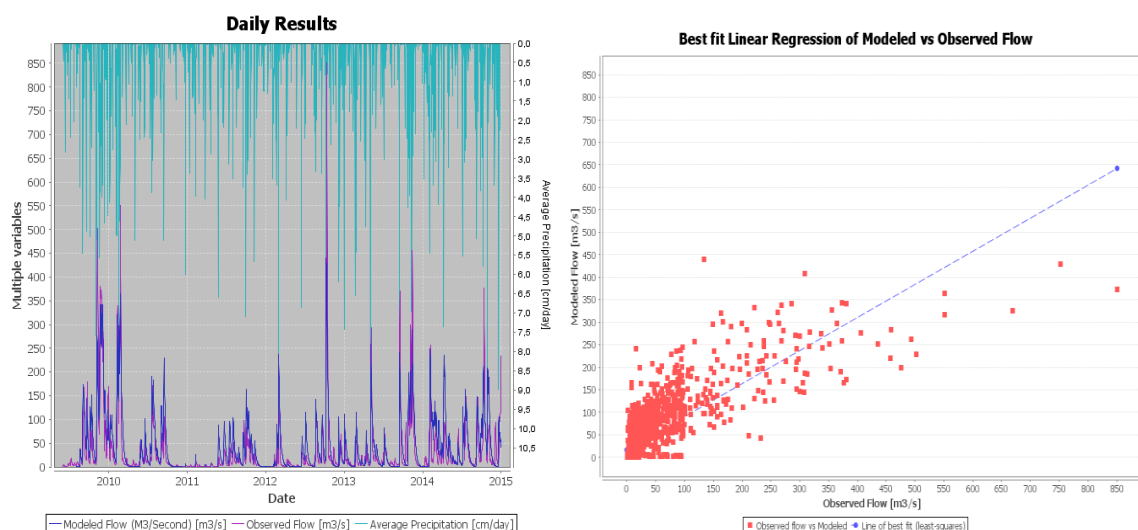


Figura 22: Gráfico de serie temporales de caudales y de mejor ajuste de regresión lineal para la validación de la subcuenca Estación Manuel Díaz



#### 4.4. Subcuenca Estación Laguna I

La estación de medición de caudal Laguna I se ubica en la cuenca del Tacuarembó, luego de que desemboca en este el Río Yaguarí, y próximo a su desembocadura en el Río Negro. Esta en el catchment que se identifica con el COMID 316541900. El área de captación de la subcuenca es de 13.867 km<sup>2</sup>, perteneciendo a esta también la subcuenca que vierte a la Estación Manuel Díaz. La Figura 23 muestra el área implicada, así como las estaciones meteorológicas consideradas en la calibración-validación.

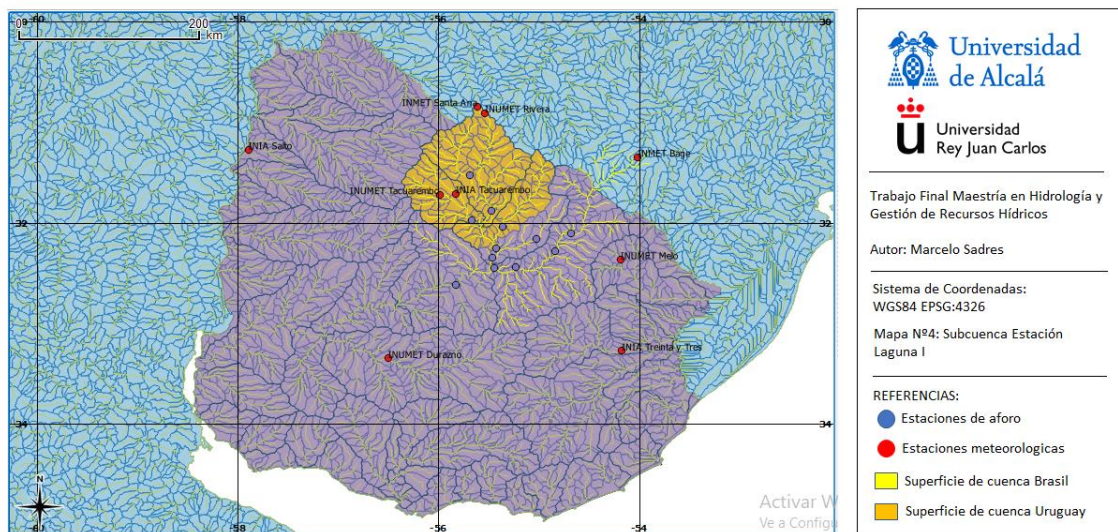


Figura 23: Área de captación subcuenca Estación Laguna I

##### 4.4.1. Calibración

La calibración se realizó considerando el intervalo 10/02/2004 a 25/06/2015, por ser la serie temporal de la que se cuenta con mayor continuidad de datos de medidas de caudal, obteniéndose los siguientes valores

- Número de curva: 0.30
- Contenido de agua disponible en el suelo: 0.20
- Infiltración: 0.0720
- Infiltración profunda: 0.0630
- Evapotranspiración en la fase del cultivo: 1.3
- Evapotranspiración en la fase de la latencia: 1.2
- Porcentaje de superficie impermeable: 0.5

y los siguientes estadísticos:

- Volumen de error (%): -0.7
- Correlación r: 0.74
- Correlación del modelo: 0.65
- Nash Efficiency: 0.53

A continuación, en la Figura 24 se muestra el gráfico de series temporales de caudales y en la 25 el de mejor ajuste de regresión lineal de los datos observados

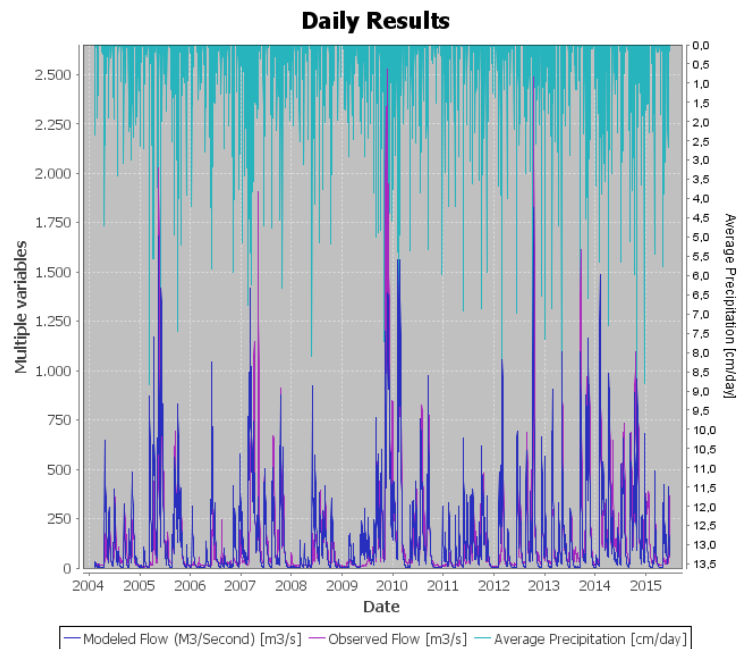


Figura 24: Gráfico de series temporales de caudales para la calibración de subcuenca Estación Laguna I

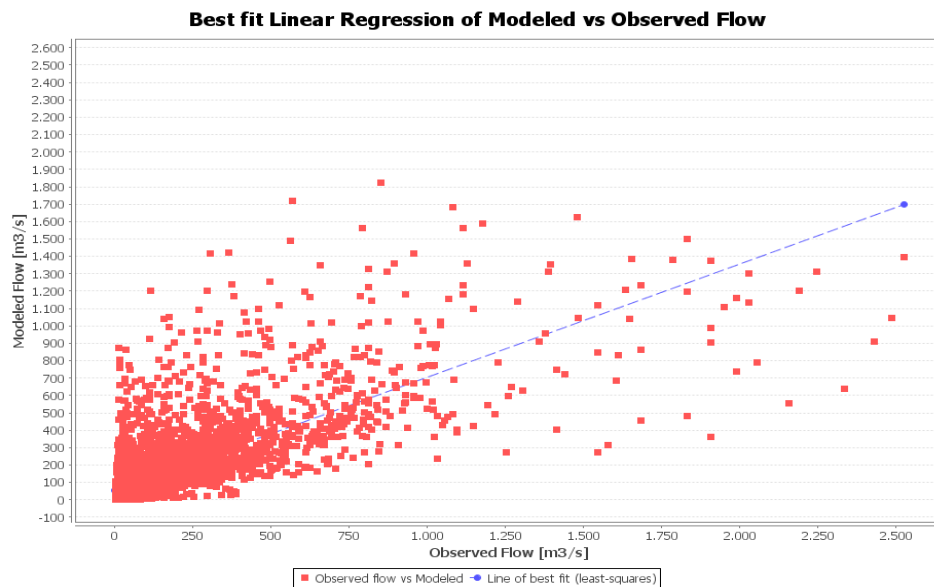


Figura 25: Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal para la calibración de subcuenca Estación Laguna I

#### 4.4.2. Validación

La validación se realizó para los periodos 14/04/1998 a 11/05/2002 y 01/01/1995 a 24/01/1998 (se identificarán como validación 1 y 2 respectivamente), utilizando como valor de los parámetros los hallados en el proceso de calibración. Los resultados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: Estadísticos obtenidos en el proceso de validación de la subcuenca Aguiar

Estadístico	Validación 1	Validación 2
Volumen de error %	-18.5	-25.24
Correlación r	0.73	0.67
Correlación del modelo	0.50	0.44
Nash Efficiency	0.52	0.43

A continuación, en la Figura 26 se muestra los gráficos de series temporales de caudales y en la 27 los de mejor ajuste de regresión lineal de los datos observados versus los datos del modelo para ambas validaciones.

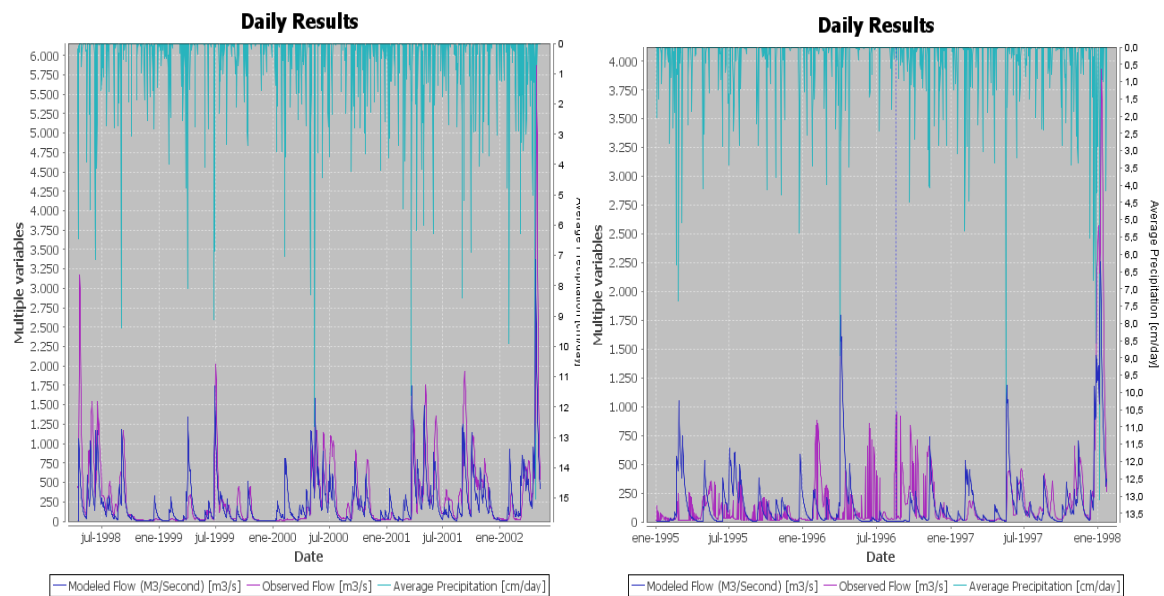


Figura 26: Gráfico de series temporales de caudales para la validación de subcuenca Estación Laguna I (Izq. Val. 1, Der. Val. 2)

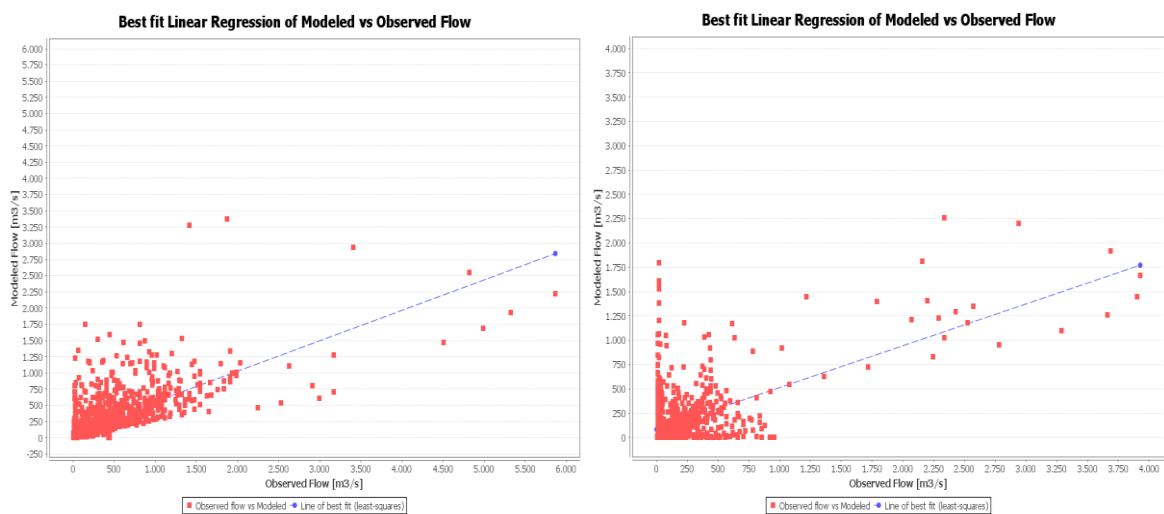


Figura 27: Gráfico mejor ajuste de regresión lineal validación de la subcuenca Estación Laguna I (Izq. Val. 1, Der. Val. 2)

#### 4.5. Cálculo de agua no disponible por conservación de caudales ecológicos

Considerando que el organismo competente aún no ha publicado los caudales ambientales para los cursos de agua considerados en el trabajo, y teniendo en cuenta que se cuenta con series históricas de datos en un intervalo mayor a 20 años, ha de calcularse los mismos de acuerdo a la sugerencia que indica la legislación, es decir teniendo en cuenta el caudal cuya probabilidad de excedencia es mayor al 60% para cada mes (situación más restrictiva en cuanto a la disponibilidad de agua).

El cálculo se realiza para las estaciones Pereira y Laguna I es decir aquellas que se encuentran aguas abajo en los tramos analizados de los ríos Negro y Tacuarembó. Esta agua ha de contabilizarse como agua no disponible, al no poder ser utilizada para eventuales captaciones superficiales. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 9.

Tabla 9: Cálculo de agua no disponible por conservación de caudales ecológicos

Mes	Estación Laguna I			Estación Pereira		
	caudal con 60% de probabilidad de excedencia (m <sup>3</sup> /s)	m <sup>3</sup> /d	caudal ambiental m <sup>3</sup> /mes	caudal con 60% de probabilidad de excedencia (m <sup>3</sup> /s)	m <sup>3</sup> /d	caudal ambiental m <sup>3</sup> /mes
<b>enero</b>	17	1,468,800	45,532,800	7	604,800	18,748,800
<b>febrero</b>	22	1,900,800	53,222,400	14	1,209,600	33,868,800
<b>marzo</b>	22	1,900,800	58,924,800	19	1,641,600	50,889,600
<b>abril</b>	28	2,419,200	72,576,000	19	1,641,600	49,248,000
<b>mayo</b>	48	4,147,200	128,563,200	32	2,764,800	85,708,800
<b>junio</b>	100	8,640,000	259,200,000	63	5,443,200	163,296,000
<b>julio</b>	95	8,208,000	254,448,000	85	7,344,000	227,664,000
<b>agosto</b>	68	5,875,200	182,131,200	73	6,307,200	195,523,200
<b>septiembre</b>	163	14,083,200	422,496,000	99	8,553,600	256,608,000
<b>octubre</b>	100	8,640,000	267,840,000	72	6,220,800	192,844,800
<b>noviembre</b>	48	4,147,200	124,416,000	37	3,196,800	95,904,000
<b>diciembre</b>	19	1,641,600	50,889,600	10	864,000	26,784,000
		Total Hm <sup>3</sup> /año	1,920.24		Total Hm <sup>3</sup> /año	1,397.09

#### 4.6. Simulación de aportes utilizando los escenarios climáticos

Una vez desarrollado el modelo ha de evaluarse como ha de afectar el efecto del cambio climático, en las aportaciones en las estaciones de aforo consideradas. Los escenarios planteados corresponden a los indicados en el apartado de materiales y métodos. La serie climática que se consideró como referencia en la simulación corresponde al período 2004 a 2013, por ser en esta la serie de diez años, donde se contaba con datos meteorológicos de más estaciones.

Los resultados obtenidos en las simulaciones para las cuatro estaciones de aforo se muestran en las Figuras 28 y 29.

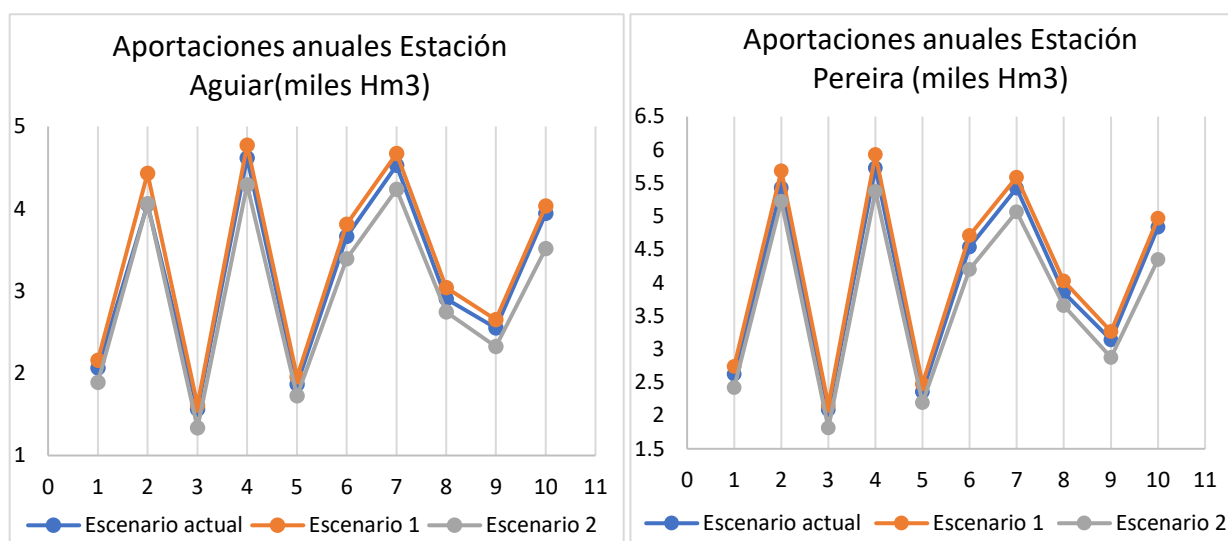


Figura 28: Aportaciones anuales en Estaciones Pereira y Aguiar para los escenarios climáticos.

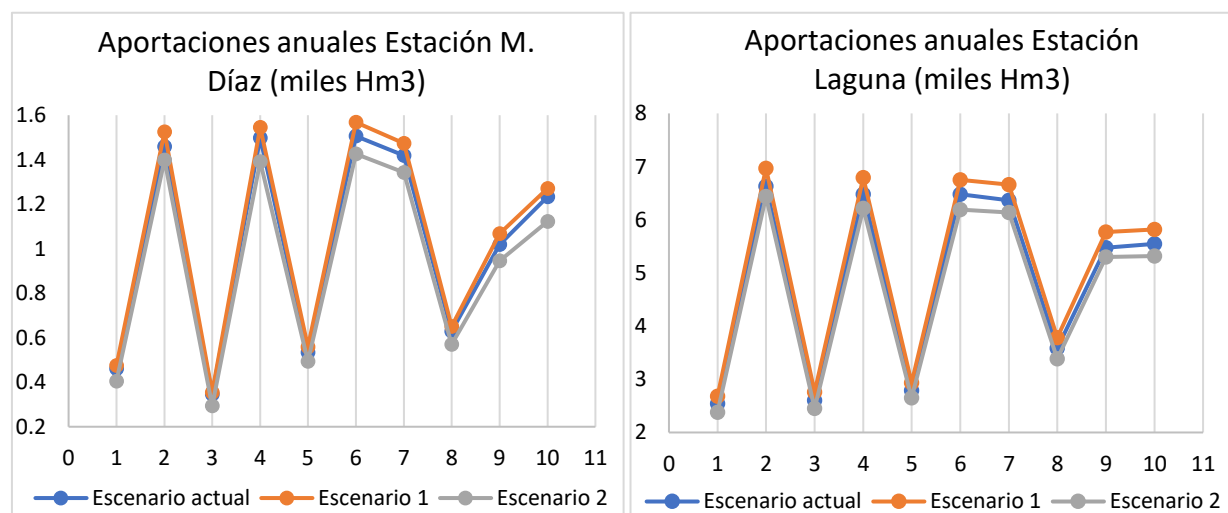


Figura 29: Aportaciones anuales en Estaciones M. Díaz y Laguna I para los escenarios climáticos.

Como se observa, la variabilidad en lo que refiere al rango de caudales máximos y mínimos registrados, está relacionada con el tamaño de la cuenca de captación, siendo mayor cuanto mayor sea esta. La forma de los gráficos que se obtienen son similares entre sí para los casos de las estaciones Aguiar-Pereira, y M. Díaz-Laguna, lo que se puede explicar porque en cada caso el área de drenaje de la segunda estación contiene a la primera, y por tener mayor similitud en las condiciones meteorológicas y características hidrogeológicas.

En la tabla 10 se muestra la variación porcentual en la aportación calculada para un periodo de 10 años en cada una de las estaciones de aforo, respecto al escenario actual.

Tabla 10: Variación en las aportaciones en las estaciones de aforo para los escenarios climáticos

Estación	Variación en el Escenario 1	Variación en el escenario 2
<b>Aguiar</b>	4.4 %	-7.0 %
<b>Pereira</b>	3.8 %	-7.1 %
<b>M. Díaz</b>	3.8 %	-7.1 %
<b>Laguna</b>	5.0 %	-4.2 %

#### 4.7. Requerimientos de agua para nuevas plantaciones

De acuerdo a Martínez L. (2013) y luego de tres años de monitoreo (octubre 2006 a setiembre de 2009), donde se hicieron análisis comparativos en Paysandú-Uruguay a nivel de parcela, la evapotranspiración total promedio de la cobertura forestal fue de 1053 mm/año, un 12% más que el correspondiente valor de 940 mm/año en la microcuenca control con pasturas naturales. La precipitación media en este período fue de 1552 mm con alternancia de años húmedos y secos. Vale mencionar que debido a la escasa información que hay en la materia estos datos han sido utilizados por la DINAMA para la toma de decisiones en proyectos de este tipo.

De esta forma se considera el agua incremental que se demandará en las subcuencas Pereira, y Laguna de acuerdo a lo siguiente:

$$\text{Agua adicional requerida} = 1053 \frac{\text{mm}}{\text{año}} - 940 \frac{\text{mm}}{\text{año}} = 113 \frac{\text{mm}}{\text{año}}$$

Considerando como aproximación que en cada subcuenca se emplazarán 45.000 nuevas hectáreas de plantaciones forestales, se obtiene así un valor de agua adicional requerida de 508.500 Hm<sup>3</sup>/año para cada una de ellas.

## 5. Discusión de los resultados

### 5.1. Sobre la calibración del modelo y los parámetros obtenidos

El proceso de calibración se ha realizado de manera manual, lo que implica de manera general una fuerte componente de análisis de la cuenca en estudio por parte de quien está ejecutando el modelo. El ajuste de los parámetros se ha realizado con el objetivo de mejorar los indicadores estadísticos, así como mediante la observación de los gráficos que se obtienen, y se dio por completado cuando se entendió que no era posible lograr mejorar las condiciones en que el modelo podría reproducir los valores observados.

HydroBID utiliza relativamente pocos parámetros para realizar el ajuste del modelo. Por ejemplo, a diferencia de HEC-HMS no tiene un módulo por el cual puedan ingresarse condiciones iniciales en lo que hace a flujo base del río, contenido de agua en el suelo y características del acuífero. Además, desde un comienzo ha sido concebido para que se pueda aplicar en la totalidad del continente americano, más allá de lo heterogéneo de sus características en lo que refiere a condiciones climatológicas, geología, caudales de los ríos, topografía, tipo y uso de suelos, dimensiones de las cuencas. Todo lo anterior ha de indicar que, aun siendo una herramienta potente, ha de tener sus limitaciones que tienen que ser consideradas en un análisis.

Comenzaremos por indicar, que, como resultado de la indeterminación en las condiciones iniciales de la cuenca, el software no considera el primer año en la corrida para la determinación de los estadísticos; del mismo modo los valores observados para este año deberíamos considerarlos con cierto cuidado en la visualización de los gráficos.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la sensibilidad en las mediciones del caudal observado, sobre todo en este tipo de cauces de caudal importante. En el caso de los datos de aforo que han de disponerse, la sensibilidad de las medidas está en el orden de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ , y esto significará que los errores de las medidas puedan ser importantes cuando se están midiendo caudales menores a  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ . Este hecho se ha puesto de manifiesto en las curvas de duración de caudales, que indican en escala logarítmica el caudal versus el porcentaje de tiempo que este es excedido. Por debajo de 1 (es decir caudales menores a  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ ), no han de resultar similares las curvas de caudales observados, y la del modelo, y se ha centrado el proceso de calibración en lograr el mejor ajuste de los valores en los caudales mayores.

Habiendo mencionado lo anterior ha de indicarse que mediante la calibración en todas las estaciones de aforo se ha conseguido un ajuste de los parámetros, a través de cuya



combinación los estadísticos resultan aceptables de acuerdo a los criterios recomendados, y un buen ajuste si se observa el gráfico de series temporales de caudales observados e indicados por el modelo. Se realiza a continuación un análisis sobre el ajuste en cada situación particular:

Estación Aguiar: Se observan algunos valores anómalos que indican caudales considerablemente altos en el modelo con respecto al observado. Así mismo un grupo de valores que habiéndose observado valores de caudal mayores a  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ , el modelo calcula caudales bajos. A pesar de lo anterior el ajuste observado en las curvas de serie temporales y los estadísticos obtenidos están significando un buen ajuste.

Estación Pereira: Si bien surge del análisis que el ajuste es bueno, ha de observarse que el modelo en cierta forma subestima los caudales máximos que se obtienen en los períodos de máximas aportaciones. Este efecto se manifiesta cuando los caudales observados superan los  $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Al querer corregir esto, por ejemplo, incrementando la escorrentía superficial directa, el porcentaje volumétrico de error se incrementa y se obtienen peores valores en los estadísticos.

Estación Manuel Díaz: Ha de observarse buenos resultados en lo que refiere a los valores estadísticos obtenidos. De la observación de los gráficos surge que la serie de caudales observados tiene mayor cantidad de picos. También se observa un valor de caudal obtenido en el modelo muy por encima de lo observado.

Estación Laguna: En este caso ha de observarse que se ha conseguido el mejor ajuste, a través del valor de los estadísticos, y el análisis del gráfico de series temporales de caudales. A pesar de esto se observa algún desfase menor en la ocurrencia de los picos.

En la tabla 11 y para realizar una discusión comparativa de los resultados obtenidos en los distintos puntos de aforo ha de indicarse los valores que se obtuvieron de los parámetros.

*Tabla 11: Resumen de parámetros obtenidos en la calibración*

Parámetro	E. Aguiar	E. Pereira	E. M. Díaz	E. Laguna
Número de Curva	0.47	0.35	0.70	0.30
Contenido de agua disponible en el suelo	0.95	0.84	0.60	0.20
Infiltración	0.0635	0.0900	0.0950	0.0720
Infiltración profunda	0.0235	0.0580	0.0380	0.0630
Evapotranspiración en la fase del cultivo	1.0	1.7	1.3	1.3
Evapotranspiración en la fase de latencia	1.0	1.0	1.1	1.2
Porcentaje de sup. impermeable	1.0	1.0	1.0	0.5



El número de Curva es un parámetro empírico que varía entre 0 y 100 y que se utiliza para estimar la escorrentía superficial luego de un evento de lluvias, considerando las propiedades de drenaje de la cuenca, en función del tipo de suelo, grado de humedad y el uso de este. El ajuste de este parámetro considera un factor multiplicador que corrige el número asignado por HydroBID a partir de los datos que incorpora la base de datos. El método ha sido desarrollado para cuencas agrícolas pequeñas de los Estados Unidos, por lo que es de esperar que no sea del todo adecuado en otras circunstancias. De manera general se observa que se ha tenido que minorar este parámetro. En todo caso, para la Estación de aforo M. Díaz, cuya cuenca de drenaje tiene dimensiones menores el efecto ha sido menos importante. Ha de considerarse además que, de acuerdo al mapa de usos de suelos, esta región se caracteriza por la producción de arroz. Como se observa en la Figura 7 existen múltiples captaciones de agua superficial, que se derivan a pequeños embalses, o tajamares y que servirán para la inundación de los campos en el período de desarrollo del cultivo. El efecto de esta situación en la escorrentía directa puede ser notable. Como es de esperar esto será más notorio en las estaciones de aforo Pereira y Laguna que tienen un alto nivel de regulación.

El AWC o cantidad de agua disponible en el suelo, representa el volumen de agua que se encuentra en la capa superior del suelo o en la zona de aireación cerca de la superficie del terreno, de forma que puede ser transferida a la atmosfera por evapotranspiración. Esto afectará además la cantidad de agua que percola a la zona saturada. Es de esperar entonces mayores valores para suelos más desarrollados. Ha de observarse que los valores obtenidos para las cuencas que drenan a la Estación Pereira y Aguiar, representan valores más altos de este parámetro y así mismo se aprecia un valor especialmente bajo para la Estación Laguna, hecho que intentará explicarse a continuación.

A partir del análisis del mapa de suelos del Uruguay ha de indicarse que las subcuencas Pereira y Aguiar se sitúan fundamentalmente sobre el área de afloramiento del Grupo Gondwana, que corresponde a un conjunto de depósitos sedimentarios de tillitas, lutitas, limolitas y areniscas feldespáticas. Son suelos bien desarrollados, de importancia agronómica capaces de almacenar agua.

Si nos referimos ahora a los suelos de la cuenca que drena a la Estación M. Díaz ha de indicarse que podemos situarlos sobre el Grupo Gondwana y el Batoví Dorado. Los tipos de roca predominante en este último grupo son las areniscas de diferentes granulometrías. En particular si se refiere a la formación Rivera encontraremos arenas eólicas. Por último,

en los suelos correspondientes a la Estación de aforo Laguna, además de los Grupos anteriormente mencionados, podemos encontrar correspondientes al Arapey. Son suelos basálticos y superficiales, por lo que es de esperar una menor capacidad de retención de agua (Bossi et al., 2011).

El R Coefficient o infiltración significa la aportación de agua subterránea a los cauces, la que dependerá a su vez de la infiltración de agua en el terreno, la evapotranspiración y la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo. Es esperable que el valor más alto de este parámetro ocurra en la cuenca de la Estación M. Díaz ya que si observamos el mapa hidrológico esta subyace sobre una unidad acuífera. Así mismo era esperable valores más bajos en las Estaciones Laguna y Pereira ya que un porcentaje importante de la superficie se establece sobre unidades con baja posibilidad de aguas subterráneas.

El Seepage o infiltración profunda representa el aporte de agua a acuíferos regionales y que por tanto no contribuye a generar aportación en las estaciones de aforo consideradas. La aportación de agua al Acuífero Guaraní hace considerar que este valor sea mayor en el caso de la Estación de Laguna, lo que se ha verificado.

Por último, la evapotranspiración se ha utilizado como parámetro de ajuste, lo que dependerá en buena medida del uso productivo de los suelos. A partir del análisis del mapa de usos de suelos se aprecia que, si bien es importante en la región, el cultivo de arroz, y forestación, el mayor porcentaje de superficie se destina a pasturas por lo que se ha tenido en cuenta como fase de crecimiento los meses de primavera. Los principales ajustes que han de realizarse entonces pueden corresponder al cambio relativo interanual de áreas destinadas al cultivo del arroz y ganadería extensiva, y la incorporación en los últimos años de cereales, oleaginosas y forestación en la región.

## 5.2. Sobre la validación del modelo

El proceso de validación se realiza a través del análisis de los estadísticos considerando las recomendaciones que en sus documentos técnicos HydroBID (BID, 2014) indica como criterio para aceptar los resultados obtenidos. Se puede indicar entonces que:

- El porcentaje de error en el volumen total en todos los casos es menor al +/- 40%.
- En todos los casos el valor de correlación  $r$  es en el orden o mayor a 0.7 lo que indica un buen ajuste.

- Aplicando como criterio el Estadístico de Nash-Sutcliffe en todos los casos el ajuste es bueno.

Así mismo a través del análisis de los gráficos de las series temporales de caudales se ha verificado que el modelo, reproduce de manera razonable los períodos donde se incrementa el caudal por eventos de precipitación, nuevamente considerando las limitaciones en lo que refiere al primer año de cada simulación. Sin embargo, ha de indicarse que en la validación 2 para la Estación Aguiar se observan diferencias importantes, subestimando el flujo total para el modelo. Esto podría explicarse considerando que solo se cuenta con dos años de mediciones, lo que hace difícil poder concluir al respecto. Diferencias importantes también se han registrado cuando se ejecutó la validación para la estación de aforo Laguna I. Los hidrogramas aquí arrojan mayor cantidad de picos, y picos más elevados para los caudales observados. Quizás este efecto en parte pueda deberse a una subestimación en el número de curva considerado en la calibración.

### 5.3. Sobre los efectos del cambio climático

La ejecución del modelo teniendo en cuenta escenarios climáticos ha considerado variaciones en la temperatura y precipitación media en la cuenca. Supone que los cambios ocurrirán de manera homogénea a lo largo del año, sin considerar factores como la estacionalidad, el incremento en la variabilidad climática y el incremento en los fenómenos extremos (temporales y sequías). Los resultados así obtenidos servirán para tener una aproximación sobre cómo ha de poder variar los aportes de los ríos frente a posibles situaciones futuras.

Del análisis de los gráficos puede decirse que la variabilidad debido a eventuales efectos del cambio climático es poco significativa respecto a las variaciones propias de caudal interanual, por el efecto de la alternancia de años más húmedos o secos.

Si se considera el escenario probable, que espera además de un aumento de la temperatura el aumento de las precipitaciones en un 5%, el modelo indica que se incrementa la aportación de agua en los ríos. El ingreso de más agua al sistema por efecto de la precipitación prevalece por sobre el incremento de la evapotranspiración por el aumento de temperatura. El incremento en el volumen para un período de 10 años, dependiendo el caso se sitúa entre el 3.8 y 5.0%. El incremento más importante se ha dado en las Estaciones Aguiar y Laguna, lo que puede explicarse por tener una menor infiltración, lo que significará también un menor aporte de agua a los acuíferos profundos, así como por la incidencia en

cada caso de la evapotranspiración, teniendo esto que ver con la capacidad de almacenamiento y uso del suelo.

Ahora si consideramos un escenario más restrictivo que toma en cuenta únicamente un incremento en la temperatura, como era de esperar, como consecuencia de una mayor evapotranspiración disminuyen las aportaciones en los cauces. Las variaciones según el caso se han estimado en el entorno de -4.2 a -7.1%. Llama la atención en la comparación el valor significativamente más bajo que se obtuvo para la Estación Laguna, lo que puede explicarse a través del modelo por la más baja capacidad de suelo para absorber agua (que podrá ser luego evapotranspirada), y el valor relativamente alto de aportación subsuperficial a los cauces determinado por el coeficiente de recesión.

## 5.4. Sobre la disponibilidad de agua en la cuenca

### 5.4.1. Incremento en el consumo de agua por las nuevas plantaciones de eucalyptus

Según Poor y Fries (1985) no hay una respuesta general a la pregunta de si los Eucalyptus consumen aguas en excesivas cantidades, porque las características del sitio, el clima y de la especie influyen en el uso de agua, lo que determina la necesidad de estudiar el impacto hidrológico de los mismos bajo condiciones locales. Las relaciones entre las plantaciones forestales y sus efectos sobre el agua han sido estudiadas a través de diferentes modalidades y enfoques de investigación, tanto a nivel de árboles aislados, como de parcelas, o microcuencas experimentales (Martínez L., 2013). Identificar cual es la mejor estrategia para estimar los efectos por la sustitución de praderas naturales ha de resultar un aspecto por lo pronto difícil de resolver.

Dos aspectos por citar como claves a la hora de intentar comprender la variación en el ciclo hidrológico: como primer lugar una disminución en la cantidad de agua que llega al suelo como consecuencia de la intercepción en la cobertura vegetal. Los agrónomos suelen distinguir este término indicando que la evapotranspiración total se calculara como la evapotranspiración del cultivo, más el agua que es interceptada por las hojas y se evapora sin nunca alcanzar el suelo. En segundo lugar, algunas investigaciones han determinado que, si la lluvia es menor que el uso potencial de agua de la plantación, y no hay barreras que impidan el desarrollo de las raíces, las plantaciones de E. glóbulos eventualmente usarán toda el agua almacenada en el suelo, incluso hasta 20 m de profundidad en el perfil (Smetnam et al. 1999). Las variaciones en el ciclo hidrológico suceden como una interacción de

fenómenos secuenciales que ocurren a nivel de la planta y el suelo, y el resultado obtenido para la cuenca surge de integrar esos efectos locales.

Desde el punto de vista del desarrollo del modelo, un camino que ha de poderse considerar es a partir del área en estudio modificar desde la base de datos el uso del suelo, lo que también hará modificar el número de curva en cada grid y la evapotranspiración cuando se ejecute el mismo. Esto tiene como principal desventaja que se debe modificar la base de datos, además de que de todos modos la tierra a sustituir se estaría seleccionando de manera arbitraria. Como principal ventaja podemos mencionar que de este modo podríamos prever para ese escenario en concreto y a través del modelo, la variación de los distintos componentes del ciclo hidrológico, y en particular la aportación a los ríos. Un camino similar, por ejemplo, es el que se utilizó en *“Modelamiento Hidrológico de la Descarga de las Cuencas Hidrológicas en el Arrecife Mesoamericano”* (Burke y Sugg, 2006) donde se desarrollaron tres mapas de cambio en la cobertura terrestre desde 2005 al 2025.

Como un camino alternativo, los efectos por el incremento de la evapotranspiración total servirán para indicar un consumo de agua “adicional” que no podrá considerarse en la aportación a los ríos por escorrentía superficial o subterránea, así como en la percolación profunda. Este es el camino que resolvió seguir el autor, estimar la cantidad de agua que ha de demandarse de manera incremental en la cuenca, lo que, si bien no se traduce de manera directa como disminución en las aportaciones de los ríos, si establece una situación límite que podrá concluir sobre el orden de magnitud de los efectos esperados y en todo caso ampliar en análisis particulares considerando el emplazamiento de los bosques en un futuro.

#### 5.4.2. Disponibilidad de agua en la cuenca

Los gráficos que se muestran en la Figura 30 y 31 muestran para las cuencas consideradas la disponibilidad de agua en los distintos escenarios climáticos. Considera los caudales ambientales definidos de manera preliminar de acuerdo a lo indicado en el capítulo de resultados. En lo que refiere a la eventual instalación de una planta de celulosa, no toma en cuenta el consumo de los procesos industriales, considerando que la misma se instalaría aguas debajo de la presa de generación hidroeléctrica quien regularía el caudal para asegurarle el suministro. En los gráficos se ha indicado el consumo esperado por nuevas plantaciones forestales en cada una de las cuencas, lo que hará reducir la aportación a los ríos y a los acuíferos profundos. El caudal disponible se calculó como el caudal anual que propicia el modelo, para los escenarios climáticos, menos el caudal ecológico.

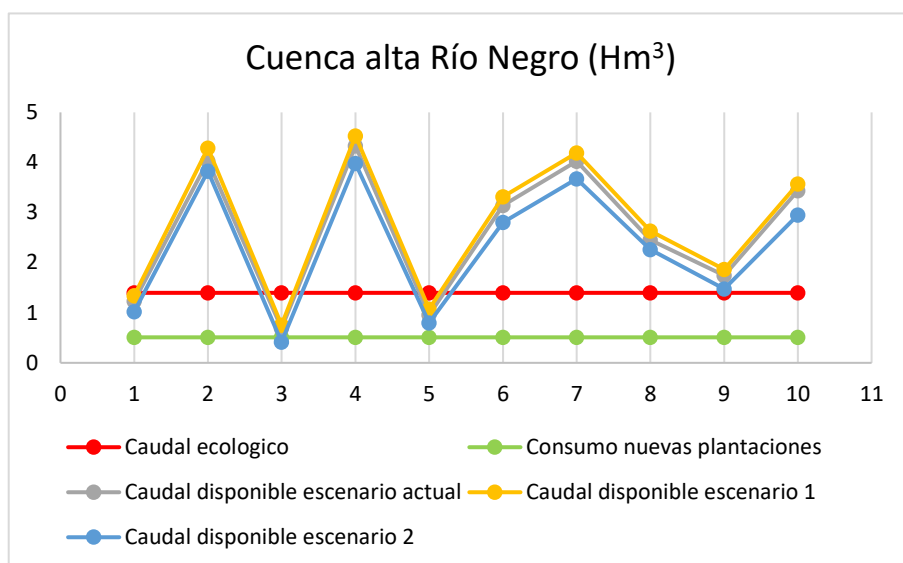


Figura 30: Disponibilidad de agua en la Cuenca Alta del Río Negro

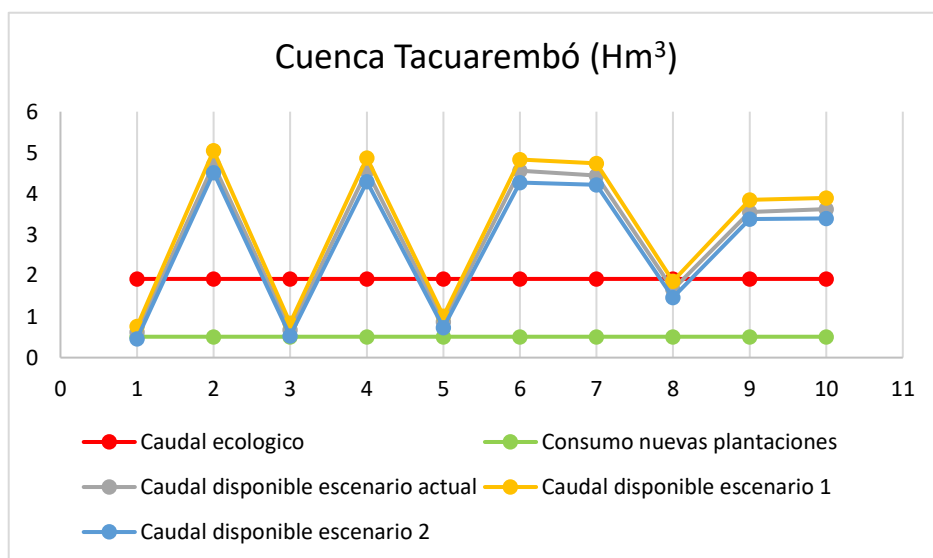


Figura 31: Disponibilidad de agua en la Cuenca Tacuarembó

En la Cuenca Alta del Río Negro podemos observar que en los escenarios planteados el agua disponible por escorrentía superficial es mayor a la demandada por las plantaciones, a excepción del año 3 si se considera el escenario de cambio climático donde solo se incrementa la temperatura. Esta misma situación sucede en la Cuenca Tacuarembó a excepción del primer año de la serie en el escenario 2.

Dado que el consumo por las plantaciones no solo hará disminuir la escorrentía superficial, sino que parte del agua se corresponde con la recarga de acuíferos profundos, es de esperar que aún en los peores escenarios pueda cumplirse con los caudales ecológicos tal como se han definido de manera preliminar.

Sin embargo, ha de poderse indicar que, para los períodos de sequía, si el cambio climático no ha de significar un incremento en la precipitación, y efectivamente se incorporan las hectáreas indicadas de eucalyptus, la presión sobre el recurso hídrico en la región ha de poder ser significativa, pudiendo limitar la posibilidad de asignar otros usos, como ser por ejemplo nuevos regadíos para cultivos.

## 6. Conclusiones

- Utilizando el programa HydroBID se ha podido desarrollar un modelo hidrológico para la cuenca alta del Río Negro, Uruguay.
- En el proceso de calibración se debe tener en cuenta los errores que se pueden ocasionar por la sensibilidad en las medidas de caudal de los aforos, en particular cuando el caudal observado es menor a 10 m<sup>3</sup>/s.
- HydroBID utiliza el método del Número de Curva para determinar la abstracción inicial, y la escorrentía superficial; habiendo sido desarrollado este para pequeñas cuencas destinadas a la producción agrícola en Estados Unidos, puede significar que los valores considerados no sean siempre lo más adecuados, siendo necesario el ajuste.
- El área en estudio es caracterizada por plantaciones de arroz, que han de abastecerse con agua superficial para el riego del cultivo, a través de la captación y su derivación a pequeños embalses o tajamares. Este hecho ha de tener incidencia en el ciclo hidrológico, y puede explicar en parte, que se haya tenido que considerar Número de Curva inferiores a los esperados.
- Si se comparan los valores obtenidos para cada una de las subcuencas, en lo que refiere a los parámetros que caracterizan el almacenamiento de agua en el suelo, la escorrentía subsuperficial, y la percolación profunda, se observa una fuerte correlación con las características geológicas e hidrogeológicas.
- A través del modelo se ha podido simular los efectos en la aportación de agua superficial por efecto del cambio climático en distintos escenarios.
- De manera inicial ha de indicarse que la incorporación de nuevas plantaciones de eucalipto no pone en riesgo el cumplimiento de los caudales ambientales, tal como los define la normativa vigente. Sin embargo, en caso de que se manifieste un escenario climático por el que se incremente la temperatura media, sin que lo hagan las precipitaciones, la presión sobre el recurso puede ser importante, lo que puede condicionar otros usos.
- El modelo desarrollado, se puede utilizar en un futuro en la asignación de caudales, para la planificación de los recursos hídricos, así como insumo para la ejecución de modelos de transporte, y análisis de las propiedades cualitativas de las masas de agua.



## 7. Bibliografía

- Arias Lastre, P (2015). Guía de Aplicaciones del HEC-HMS en cuencas cubanas. Trabajo de Diploma Título de Ingeniero Hidráulico. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana.
- Belmonte, F., Romero, A. (2009). Balance hídrico y trascolación bajo cobertura de pino. Departamento de Geografía Física, Universidad de Murcia.
- BID (2014). Base de Datos de Hidrología para América Latina y el Caribe, 2014. Hydro-BID.
- BID (2014). Nota Técnica 2: Un sistema integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos, 2014. HydroBID.
- Bossi, J., Caggiano R., Ortiz, A (2011). Manual de Geología para estudiantes de Agronomía. Facultad de Agronomía, UDELAR.
- Bossi, J. (2007). Regiones Geológicas del Uruguay. Apuntes Facultad de Agronomía, UDELAR.
- Burke, L., Sugg, Z. (2006). Modelamiento Hidrológico de la Descarga de las Cuencas Hidrológicas en el Arrecife Mesoamericano. World Resources Institute.
- Diario Oficial (2018). Decreto 368/018 del 13 de noviembre de 2018. Diario Oficial Número 30.068 de 13 de noviembre de 2018, página 3-5.
- Díaz, R., Rébori, M. (2003). Intercepción de la lluvia en un monte de Eucalyptus dunii. Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias INTA, Buenos Aires.
- Heinzen, W., Carrión, R., Massa, E., Pena, S., Stapff, M. (2003), Mapa Hidrológico del Uruguay. Escala 1:100.000. Dirección Nacional de Minería y Geología, MIEM.
- INIA (2009). Cambio Climático en Uruguay, posible impactos y medidas de adaptación en el Sector Agropecuario. Serie Técnica 178, 11-17. Montevideo.
- Martínez, L. (2013). Estimación del consumo de agua en una plantación adulta de eucalyptus. Tesis de Magister en Ciencias Agrarias, UDELAR, Uruguay.
- Martínez Fernandez, J. (2014). Cambios en la cubierta vegetal y recurso hídricos: un análisis de la intercepción en la cuenca del Duero. Departamento de Geografía, Universidad de Salamanca.
- MVOTMA (2016). Cambios de uso de suelo y degradación de ecosistemas en Uruguay. Abril 2016, Bogotá, Colombia.
- MVOTMA (2017). Plan Nacional de Aguas. Diciembre 2017, Montevideo.

- ONU, Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás. París, UNESCO.
- Pascual, Aguilar J.A., Díaz, M. (2016). Guía Práctica sobre modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS. Centro para el conocimiento del Paisaje, Instituto IMDEA Agua, Alcalá de Henares.
- Poor M., C Fries. 1985. The ecological effects of Eucalyptus. Rome, Italia. FAO Forestry Paper N° 59. Pág. 87.
- RAPAL Uruguay (2010). Contaminación y eutrofización del agua: Impactos del modelo de agricultura industrial.
- Rodríguez López, Y. (2011). “Modelación hidrológica de avenidas. Caso de estudio: Cuenca del río Zaza.” Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Instituto Superior politécnico José Antonio Echevarría, La Habana.
- Sánchez San Román F. Javier (2017). Hidrología Superficial y Subterránea. Salamanca (pp. 107-156).
- Singh, V., Woolhiser, D., (2002). Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. Journal of hydrologic engineering, July-August 2002, 270-292.
- Smettam K, P Farrington, R Harper, DS Crombie, D Williamson. 1999. Soils constraint to tree water use. Land and Water Research and Development Corporation Grant UWA 15 Final Report.
- UTE (2006). Aprovechamiento Hidroeléctrico del Río Negro.
- WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme for Water Supply and Sanitation (2006). Coverage Estimates Improved Drinking Water.
- [www.dinama.gub.uy](http://www.dinama.gub.uy).
- Sistema de Información Ambiental
- <https://www.dinama.gub.uy/visualizador/index.php?vis=sig>. Accedido el 17 de marzo de 2017.
- [www.inia.uy](http://www.inia.uy)
- Banco de datos Agroclimáticos, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias.
- <http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>. Accedido el 15 de marzo de 2019.

[www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br)

Banco de dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa, Ministério da Agricultura, pecuária e Abastecimiento. Brasil.

<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Accedido el 15 de marzo de 2019.

[www.topographic-map.com](http://www.topographic-map.com)

<http://en-ca.topographic-map.com/places/Uruguay-4077415/>. Accedido el 17 de marzo de 2019.

[www.upm.com.uy](http://www.upm.com.uy). Contrato de inversión

[https://medios.presidencia.gub.uy/tav\\_portal/2017/noticias/NO\\_Y823/contrato\\_final.pdf](https://medios.presidencia.gub.uy/tav_portal/2017/noticias/NO_Y823/contrato_final.pdf). Accedido el 17 de marzo de 2019.

[www.ute.com.uy](http://www.ute.com.uy)

<https://portal.ute.com.uy/Novedades/Lluvias/precipitacionesocurridaprevisiondeniveles.htm>. Accedido el 01 de febrero de 2019.

## 8. Anexo I- Clasificación de los modelos hidrográficos

Categoría	Diferencia	Descripción
Empírico (o teórico)	Esta diferencia se concentra en la base de conocimientos sobre los cuales los modelos matemáticos son desarrollados.	Un modelo empírico es construido a partir de las observaciones de la entrada y la salida, sin tratar de representar el proceso de la conversión explícitamente.
Conceptual		Un modelo conceptual es construido sobre la base de conocimientos de los procesos pertinentes físicos, químicos, y biológicos, que actúan en la entrada para producir una salida.
Escala de evento	Esta clasificación está relacionada con el tiempo de simulación.	Un modelo a escala de evento simula una tormenta simple. La duración de la tormenta puede variar desde pocas horas hasta unos pocos días.
Simulación continua		Un modelo continuo simula un periodo más largo, prediciendo la respuesta de la cuenca durante y entre los eventos de precipitación.
Determinístico	Esta clasificación se basa en que el modelo considere o no aleatoriedad.	Si todos los parámetros de entradas y procesos en un modelo son considerados libres de variaciones aleatorias y se conocen con certeza, el modelo es determinístico.
Estocástico		Si el modelo describe las variaciones aleatorias e incorpora la descripción en predicción de la salida, este modelo es estocástico.
Lineal	Esta categoría se establece en función del tipo de ecuaciones (lineales o no) empleadas para representar un fenómeno.	Es formulado en términos de ecuaciones y procesos lineales.
No Lineal		Está descrito por ecuaciones y procesos no lineales
Agregado	Se diferencian en cómo evalúan al sistema en el espacio considerado	La variación espacial (geográfica) es promediada o ignorada, o sea, que evalúa al sistema como un promedio en el espacio considerado.
Distribuido		Considera que los procesos hidrológicos ocurren en varios puntos del espacio y define las variables del modelo como funciones de las dimensiones del espacio.
Continuo	Esta diferencia se basa en la existencia o no de la derivada de la función empleada.	La función empleada por el modelo posee derivada en cualquier punto de su dominio.
Discreto		La función empleada por el modelo carece de esta propiedad.
Parámetros medidos	Esta distinción es crítica en la selección de los modelos para la aplicación cuando las observaciones de la entrada y la salida no están disponibles.	Un modelo de parámetros medidos es aquel en el cual los parámetros del modelo pueden ser determinados por las propiedades del sistema, ya sea por mediciones directas o por métodos indirectos los que están basados en mediciones.
Parámetros ajustados		Un modelo de parámetros ajustados incluye parámetros que no pueden ser medidos. Por tanto, los parámetros deben ser encontrados mediante un ajuste del modelo con los valores observados de la entrada y la salida.

*Tomado de Rodríguez López, 2011*